

Programme de Coopération franco-thaïlandais pour l'Enseignement supérieur et la Recherche. Projet HEVEA (Agriculture n° 3)

**Rapport de la période 2002-2004
(Premier appel à propositions)**

**CLEMENT-DEMANGE André
CIRAD (« Cultures pérennes »)**

**CP_SIC XXXX
Mai 2006**

Sommaire

Résumé	iii
L'hévéa, en bref	vi
Introduction	1
1. Cartographie génétique de l'hévéa pour l'analyse de caractères agronomiques. 2	
1.1. Le contexte de l'amélioration génétique de l'hévéa	2
1.2. Marqueurs génétiques moléculaires (bases générales de compréhension). 3	
1.3. Identification clonale, contrôle de conformité, et analyse de diversité	6
1.4. Cartographie génétique et approche QTL	7
1.4.1. Génotypage et cartographie génétique	8
1.4.2. Etude en champ (phénotypage)	9
2. Ecophysiologie : fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa	10
2.1. Quelques éléments de bibliographie	10
2.2. Saignée et partition des assimilats	11
2.3. Modélisation du fonctionnement hydrique et carboné de jeunes hévéas ...	15
2.4. Dynamique de formation et de remobilisation des réserves	19
2.5. Discussion sur les résultats obtenus en écophysiologie	21
3. Optimisation des systèmes de saignée	22
3.1. Le contexte des plantations thaïlandaises	23
3.2. Expérimentation de systèmes de saignée	23
3.3. Amélioration de la productivité des arbres et de la saignée.....	24
4. Etude de la qualité du caoutchouc naturel	25
4.1. Le projet d'étude de la qualité du caoutchouc naturel	25
4.2. Premiers résultats portant sur la méthodologie	26
4.3. Perspectives	27
5. Facteurs d'amélioration de la production de bois d'hévéa	27
Conclusion	30
Bibliographie	33
ANNEXE 1 - Institutions et principaux chercheurs et étudiants participant au projet Hévéa-Agriculture n° 3 (2002-2004).	35
ANNEXE 2 - Evaluation finale du projet.....	36
DEVELOPPEMENT SCIENTIFIQUE EU EGARD AUX OBJECTIFS AFFICHES.....	36
Rappel des objectifs du projet	36
Rappel des résultats escomptés aux niveaux formation et recherche.....	37
Résultats atteints.....	37
Commentez les écarts éventuels entre prévisions et réalisations	38
COMPLEMENTARITE DE LA COOPERATION (apport et intérêt de chaque partie) 38	
Relations en général et concertations entre les partenaires français et thaïlandais	38
Fréquence des concertations	39

CONTRIBUTION A LA FORMATION DE JEUNES CHERCHEURS ET/OU DOCTORANTS.....	39
Nombre de thèses de doctorat développées dans le cadre du projet.....	39
Nombre de jeunes chercheurs français et thaïlandais impliqués par des stages et de séjours de recherche	39
Nombre de Post-doc	39
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS / AUTRES RETOMBEES (brevets, innovation,...).....	39
Donnez le nombre et la nature des publications.....	39
Manifestations scientifiques : séminaires, conférences, ateliers,.....	40
ADEQUATION DES MOYENS DEMANDES/ACCORDES/UTILISES EU EGARD AUX RESULTATS	40
Nombre de missions demandées/accordées/utilisées de Professeurs / Chercheurs français en Thaïlande (commentez).....	40
Nombre de missions demandées/accordées/utilisées de Professeurs / Chercheurs thaïlandais en France (commentez).....	41
Nombre de mois de séjour demandés/accordés/utilisés de jeunes chercheurs et/ou doctorants français en Thaïlande (commentez)	41
0 -	41
Le projet était orienté sur la formation d'étudiants et de chercheurs thaïlandais. Nous avons donc privilégié cet objectif et n'avons pas engagé de jeune chercheur français sur le projet.	41
Nombre de mois de séjour demandés/accordés/utilisés de jeunes chercheurs et/ou doctorants thaïlandais en France (commentez)	41
Liens avec d'autres programmes (RGJ, ASIA-LINK, DUO, ...) et ouverture regionale	41
Programmes bilatéraux (EIFFEL, RGJ, DUO-France,...).....	41
Programmes Multilatéraux (ASIA-LINK, AUNP, ERASMUS MUNDUS,...)	41
Programmes régionaux	42
Perspectives de cooperation post-projet.....	42
Envisageriez-vous de développer de nouveaux projets avec les mêmes partenaires thaïlandais, d'autres partenaires ? (Quel type de projet, cadre,...)	42
Observations et remarques.....	42

Résumé

Le projet Hévée-Agriculture 3 (Programme de Coopération franco-thaïlandais pour l'Enseignement supérieur et la Recherche) a contribué efficacement, au cours de la période 2002-2004, à la dynamisation du projet franco-thaïlandais de recherche et de formation « Vers l'amélioration de la productivité de l'hévée », en assurant le financement des frais de déplacement de 10 missions en Thaïlande de chercheurs français, de 4 missions en France de professeurs et chercheurs thaïlandais en France, et surtout de 7 stages en France de 4 étudiants et jeunes chercheurs thaïlandais réalisant un Ph.D. La durée cumulée des stages a été de 13 mois.

A la fin de l'année 2004, une démarche expérimentale d'analyse génétique des facteurs biochimiques de la typologie métabolique des clones cultivés est mise en place, avec l'obtention d'une carte génétique saturée qui a été achevée en mai 2005. Elle constitue la première étape d'une mise en relation des méthodes de génétique moléculaire et de sélection conventionnelle pour l'amélioration de la production de latex.

Les principaux résultats obtenus en écophysiologie sont les suivants :

- La cartographie de l'aire d'écorce drainée par l'écoulement du latex lors de la saignée montre une augmentation de la surface de l'aire drainée avec l'intensification de l'exploitation.
- La mesure des variations de croissance radiale du tronc est apparue comme un bon indicateur de la disponibilité en eau chez les arbres non saignés, tandis que cette croissance radiale est fortement perturbée par la saignée. Le ralentissement de la croissance consécutif à la reprise de saignée en début de saison des pluies est observé très rapidement, en moins de deux semaines. De plus, aucune différence de croissance n'est observée en saison sèche, pendant l'arrêt de saignée du motif normalement saigné, entre les motifs normalement saignés et non saignés, indiquant l'absence probable d'arrière effet de la saignée ; il faut néanmoins remarquer que cette croissance en saison sèche est particulièrement faible. Ces résultats confirment donc que la compétition entre croissance et production de latex s'exerce directement et quasi immédiatement sur les assimilats hydrocarbonés de la photosynthèse.
- L'activité respiratoire est importante en période de végétation, et minimale lors de la période de défoliation-refoliation en saison sèche. On observe une forte relation entre l'activité respiratoire de l'écorce et la croissance radiale du tronc non saigné ; en revanche, la respiration du tronc saigné est fortement modifiée, avec une forte variabilité entre arbres, notamment entre les arbres stimulés, et sans relation avec la croissance. La question de la relation entre respiration et saignée reste à approfondir.
- Les réserves hydrocarbonées sont essentiellement constituées d'amidon dans le bois. Un stockage plus important est observé au niveau de l'encoche de

saignée, qu'on explique par un appel d'assimilats particulièrement important vers ce puits physiologique ; en revanche, on rappelle que c'est aussi la zone de croissance minimale du tronc saigné. Les réserves s'accumulent au cours de la période de végétation et jusqu'à la défoliation. Un déstockage important intervient lors de la refoliation. Cette étude de la dynamique des réserves est poursuivie avec un objectif de mise en relation avec l'intensité d'exploitation du latex. L'activité enzymatique associée au déstockage par hydrolyse de l'amidon en saccharose, en relation avec l'intensité d'exploitation, est également étudiée.

- Une paramétrisation pour l'hévéa du modèle de photosynthèse de Farquhar et du modèle de conductance stomatique de Jarvis a été réalisée, permettant d'évaluer l'importance des facteurs climatiques sur la photosynthèse et la transpiration. L'influence de la température sur la capacité photosynthétique et surtout sur la conductance stomatique est apparue particulièrement importante, avec des effets de réduction importants pour une étroite variation de température autour de son optimum. Les facteurs de la photosynthèse et de la transpiration ont été caractérisés pour différents clones et en présence de stress hydrique.
- L'étude de la vulnérabilité à l'embolie renseigne sur la sensibilité de la régulation stomatique des arbres vis-à-vis du stress hydrique. Des différences de vulnérabilité ont été trouvées entre les organes. La vulnérabilité des pétioles de feuilles serait un bon facteur de discrimination entre les clones pour cette régulation.
- Les deux modèles INRA de photosynthèse et de transpiration, appliqués à l'échelle de deux jeunes arbres entiers, fonctionnant l'un en l'absence et l'autre en présence de stress hydrique, ont fourni de bonnes prédictions de l'assimilation.

Une expérimentation a été mise en place dans le cadre du projet, avec mise en œuvre du diagnostic latex, afin d'optimiser les systèmes d'exploitation du latex sur différents clones. La démarche classique d'amélioration de la productivité du travail de saignée par la réduction de la fréquence de saignée compensée par la stimulation éthylénique s'avérait peu adaptée au contexte des très petites surfaces des plantations familiales en Thaïlande. Un système original comportant deux encoches saignées alternativement (Double Cut Alternative) a été conçu et mis en expérimentation. Sur les trois premières années de saignés, on observe une augmentation de 25 % sur la productivité des arbres (kg/arbre/an) et une augmentation identique de 25 % sur la productivité des saigneurs (kg/saigneur/jour). Ce système fait actuellement l'objet d'une évaluation de longue durée.

La composante d'étude des facteurs de variabilité de la qualité du caoutchouc naturel, mise en place plus tardivement dans le projet Hévéa, s'est attachée à préciser différents aspects méthodologiques concernant l'extraction des lipides du caoutchouc sec ou du latex, à tester différents modes de séparation par chromatographie, et à définir ses procédures expérimentales.

Dans le prolongement du projet Hévéa, deux ateliers régionaux, financés par le Fonds régional d'appui à l'éducation et à la recherche de l'Ambassade de France à Bangkok, ont été organisés sur la question de la production agricole du bois d'hévéa, ont été organisés en novembre 2003 et mai 2005, permettant de réunir 15 chercheurs de 5 pays hévéicoles du sud-est asiatique. Parmi les différents thèmes abordés, une attention particulière a été portée à la méthodologie de construction de modèles dendrométriques de croissance permettant de prendre en compte, chez l'hévéa, la dualité entre production de latex et de bois.

Le projet Hévéa a fait l'objet d'une évaluation en 2004 et a été reconduit sur la période 2004-2010 avec un élargissement des objectifs et avec un élargissement des partenariats à l'Ird, l'Inra-Bordeaux (France) et l'Université Prince of Songkhla (Thaïlande). Les recherches de ce projet devraient permettre la réalisation de 9 thèses de Ph.D. La proposition du projet Hévéa au second appel à propositions du Programme de Coopération franco-thaïlandais pour l'Enseignement Supérieur et la Recherche, pour la période 2005-2008, a reçu une réponse positive.

L'hévéa, en bref

L'hévéa (*Hevea brasiliensis*, famille des Euphorbiacées) fournit un agro-matériau renouvelable à usage industriel doté de qualités spécifiques, le caoutchouc naturel, qui représente 40 % de l'utilisation mondiale des élastomères (caoutchoucs naturel et synthétique). Le latex n'est pas une sève mais une émulsion laiteuse contenant les particules de caoutchouc, constituée par le cytoplasme des cellules laticifères présentes dans l'écorce du tronc. Depuis 20 ans, le bois d'hévéa est également exploité de façon croissante au moment de l'abattage des parcelles âgées, principalement pour la fabrication de petit mobilier ; ce bois est devenu un deuxième produit de l'hévéaculture : sa part représente actuellement environ 15 % dans la rentabilité des parcelles. L'arbre à caoutchouc a été intensément exploité dès la découverte de la vulcanisation par Goodyear en 1839 : ce procédé permet de préserver l'élasticité, propriété essentielle du caoutchouc naturel. 70 % de la production est destinée à la fabrication de pneumatiques.

L'hévéaculture résulte d'une domestication initiée en 1876 avec le premier transfert de graines du Brésil vers l'Asie du Sud-Est. Le paradoxe de l'hévéaculture est qu'elle n'a jamais pu véritablement se développer en Amérique du Sud, aire d'origine de l'hévéa, du fait de la maladie sud-américaine des feuilles due au champignon *Microcyclus ulei*. Développée en Asie à l'époque coloniale par de grands groupes agro-industriels, l'hévéaculture est progressivement devenue une activité de petites plantations familiales inférieures à cinq hectares, pour les trois quarts des surfaces existantes. En 2004, la Thaïlande a fourni 35 % des 8.4 millions de tonnes produites dans le monde. Selon les systèmes de production et l'âge des plantations, la production annuelle par hectare de caoutchouc sec peut varier entre 300 et 2500 kg. Le prix FOB du caoutchouc naturel séché varie selon des fluctuations pluriannuelles entre 0,5 et 1,5 US \$.

Les clones de greffe obtenus par multiplication végétative constituent actuellement le type variétal le mieux adapté à l'hévéaculture. Une parcelle d'hévéa est mise en saignée 6 à 8 ans après le planting des plants greffés, et la production de latex peut s'étaler sur 20 à 30 ans. La saignée (récolte du latex) est pratiquée périodiquement tous les 2 à 5 jours. Les techniques de saignée ont progressivement évolué pour optimiser le cycle de l'écoulement, de la coagulation puis de la régénération du latex dans le tissu laticifère de l'écorce du tronc. Le tissu laticifère soumis à la saignée ne fonctionne efficacement que s'il est correctement alimenté en saccharose (source d'énergie et précurseur de la molécule de caoutchouc) provenant directement ou indirectement de la photosynthèse, et en eau. La mise en saignée introduit une compétition très forte entre la production de latex et la croissance de l'arbre pour l'utilisation des assimilats.

Introduction

Au cours des années 1980, Igor Besson, un agro-sociologue français, avait réalisé, avec l'appui de l'Institut français de Recherches sur le Caoutchouc (IRCA), une étude approfondie sur les petites plantations d'hévéa du Sud de la Thaïlande (thèse de doctorat soutenue en 2002). A partir de 1993, un premier projet franco-thaïlandais de recherche sur l'hévéa en Thaïlande, centré sur une démarche de physiologie moléculaire avec l'application à l'hévéa des biotechnologies, associait le Cirad, l'IRD, Mahidol University et le Rrit-Doa. En 1998, une réorganisation des objectifs et des partenariats a conduit à la mise en place pour une durée de six ans (1998-2004) d'un nouveau projet tripartite associant le Cirad, Kasetsart University et le Rrit-Doa. Dès 1999, l'unité d'écophysiologie INRA-Piaf (Clermont-Ferrand) a été étroitement associée à ce projet et y a joué un rôle majeur. Ce projet, renouvelé pour la période 2004-2006 avec une extension des partenariats (IRD, INRA-Bordeaux, Prince of Songkhla University), s'appelle : « Vers l'amélioration de la productivité de l'hévéa (Towards the improvement of the productivity of the rubber tree) ». Les thématiques développées au sein de ce projet sont :

- l'analyse génétique et l'optimisation de l'amélioration génétique de l'hévéa par emploi de marqueurs génétiques moléculaires en vue d'une sélection assistée par marqueurs
- l'étude du fonctionnement physiologique de l'hévéa (tissus, organes, arbre entier, peuplement végétal), en croissance et en saignée, et notamment du système laticifère, en relation avec l'environnement écologique (l'écophysiologie constitue le principal champ disciplinaire du projet)
- l'optimisation des systèmes de saignée de l'hévéa pour l'amélioration des revenus des paysans dans le contexte thaïlandais dominé par l'importance des petites plantations familiales
- l'étude des facteurs de variabilité de la qualité du caoutchouc naturel en vue de réduire cette variabilité et de faciliter l'usinage, afin de renforcer la compétitivité de cet agro-matériau vis-à-vis de ses concurrents synthétiques.

De 1999 à 2001, ce projet a reçu un appui financier annuel de l'Ambassade de France à Bangkok pour le financement de missions de chercheurs français en Thaïlande et de missions et stages de chercheurs et étudiants thaïlandais en France.

En 2001, la mise en place du Programme de Coopération franco-thaïlandais pour l'Enseignement supérieur et la Recherche (PCER) a conduit à un premier appel à proposition de projets. La proposition du projet Hevea a été retenue sous le titre : « Projet Hévéa-Agriculture n° 3 », ce qui a permis le financement de la plus grande partie des frais de déplacement et d'hébergement des chercheurs en mission et étudiants et thésards en stage au cours de la période 2002-2005. Par ailleurs, deux séminaires régionaux organisés dans le cadre du projet et portant sur la prise en compte de la production de biomasse et de la valorisation du bois d'hévéa ont été financés, en 2003 et 2005, par le Fonds régional d'appui à l'éducation et la recherche de l'Ambassade de France à Bangkok.

Le présent rapport rend compte des activités développées par le projet au cours de la période 2002-2004 couvrant le premier appel d'offre du Programme de coopération franco-thaïlandais pour l'enseignement supérieur et la recherche, et des résultats acquis, tant dans le domaine de la recherche que de celui de la formation par la recherche d'étudiants et jeunes chercheurs thaïlandais dans les domaines suivants :

- Cartographie génétique de l'hévéa pour l'analyse génétique de caractères agronomiques
- Ecophysiologie : fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa
- Optimisation des systèmes de saignée de l'hévéa pour l'amélioration des revenus des petites plantations
- Etude de la qualité du caoutchouc naturel
- Facteurs d'amélioration de la production de bois d'hévéa

1. Cartographie génétique de l'hévéa pour l'analyse de caractères agronomiques

Le développement rapide des biotechnologies depuis 20 ans apparaît extrêmement attractif d'une part par l'accès à des capacités nouvelles d'investigation et d'autre part par des perspectives nouvelles en amélioration génétique. La demande de coopération de la Thaïlande portait principalement sur ce domaine lors du premier projet de recherche développé à partir de 1993 avec l'Université de Mahidol. Lors des discussions avec l'Université de Kasetsart et le Ririt-Doa en 1997, l'application à l'hévéa de l'utilisation des marqueurs génétiques moléculaires avait été retenue comme l'un des objectifs prioritaires.

1.1. Le contexte de l'amélioration génétique de l'hévéa

Les clones de greffe diffusés par multiplication végétative constituent le type variétal quasi exclusif développé en hévéaculture. Le passage des plantations de graines aux plantations d'hévéas greffés a constitué, d'abord en Malaisie puis en Thaïlande et dans la plupart des autres pays producteurs une véritable « révolution clonale ». Le choix de ce type variétal découle en effet des caractéristiques biologiques de cet arbre (long cycle reproductif et faible coefficient de multiplication par graines) et de la possibilité de multiplier végétativement à l'identique par greffage toute combinaison génétique avantageuse et identifiée dans un seul arbre élite. Cependant la partie racinaire constituée par le porte-greffe reste non clonale et quasiment non sélectionnée. Les recherches en culture in vitro visent à optimiser les possibilités du clonage par l'obtention de clones entiers non greffés et de porte-greffes clonaux. L'identification de clones élites pouvant être recommandés à grande échelle s'inscrit dans un processus continu mais nécessairement long (environ 20 ans entre la réalisation d'un croisement et le développement d'un clone descendant de ce croisement). Les tentatives visant à réduire la durée de la sélection doivent cependant être considérées avec précaution car elles peuvent nuire au gain génétique par unité de temps et donc à l'efficacité globale de la sélection.

La recherche en génétique entreprise dans le cadre du projet Hévée-Agriculture 3 résulte des considérations suivantes :

- a) L'intérêt porté aux marqueurs génétiques moléculaires chez l'hévée se justifie par certaines applications de recherche ou de développement à court terme (analyse de diversité génétique, analyse de parenté, et surtout identification des clones et contrôle de conformité clonale des jardins à bois de greffe ou des plants greffés produits par les pépiniéristes), par des possibilités d'analyse de la constitution génétique de caractères agronomiques, et par la perspective à plus long terme de screening très précoce de grandes populations de génotypes (sélection assistée par marqueurs) susceptible de raccourcir efficacement la durée de sélection.
- b) Les recherches sur la physiologie du laticifère ont montré que les clones cultivés d'hévée sont structurés selon une typologie métabolique comportant schématiquement des clones à métabolisme actif mais dotés de faibles réserves en saccharose (type PB260 ou RRIM600), et d'autres dotés de réserves importantes et pouvant être intensifiés par la stimulation éthylénique (type PB217 - voir paragraphes 2 et 3). Une hypothèse a été émise sur la possibilité d'obtenir dans les descendance de croisements entre parents contrastés les qualités complémentaires de ces deux types de clones. Il était donc souhaitable d'entreprendre l'étude de l'un de ces croisements avec une analyse du déterminisme génétique des critères physiologiques qui définissent cette typologie métabolique (paramètres du diagnostic latex).
- c) L'amélioration génétique de l'hévée réalise des croisements puis sélectionne parmi les descendance. Mais on constate que de nombreux croisements sont réalisés en faible effectif (quelques dizaines de descendants) et que les comparaisons entre les croisements sont faiblement pris en compte. Une démarche complémentaire consiste à explorer de façon plus approfondie certains croisements particulièrement intéressants sur de grands effectifs (quelques centaines de descendants) afin d'extraire les individus élites de ces croisements.

1.2. Marqueurs génétiques moléculaires (bases générales de compréhension)

On rappelle que la génétique, appliquée à la sélection, porte sur la transmission héréditaire des caractères. Chaque individu diploïde issu de la fécondation de deux gamètes parentaux haploïdes (reproduction sexuée) porte un double jeu de chromosomes provenant de chacun de ses deux parents. Ainsi l'hévée est une plante diploïde comprenant 18 couples de chromosomes. Chez un individu, chaque gène comporte deux versions (allèles), et les allèles des différents gènes constituent ainsi une combinaison propre à l'individu, avec une variation quasi infinie des combinaisons possibles entre les individus. Chez chaque parent, les gamètes sont produits au cours d'un processus de division cellulaire fondamental, la méiose, qui génère des recombinaisons nombreuses entre les allèles des différents gènes. Les descendants d'un croisement sont donc semblables à leurs

parents du fait des allèles communs, mais différents du fait des combinaisons différentes.

Depuis la découverte des lois de Mendel décrivant les caractères les plus simples issus d'un ou deux gènes, la sélection s'est complexifiée, utilisant de plus en plus les mathématiques pour modéliser les caractères génétiques dont la variation est continue (caractères dits quantitatifs, que l'on suppose contrôlés par un très grand nombre de gènes). L'expression phénotypique de ces caractères est fortement modifiée par les variations de l'environnement (milieu écologique et techniques d'entretien des plantes). L'héritabilité d'un caractère agronomique est la proportion de variation génétique dans la variation totale (génétique et environnement) au sein d'une population. Il est plus facile de sélectionner sur des caractères fortement hértables donc moins sensibles aux effets d'environnement car on peut prédire la valeur des individus de façon plus précise. Les marqueurs génétiques moléculaires ont une héritabilité de 100 %. Le développement récent des marqueurs génétiques moléculaires et de la cartographie génétique permet désormais, pour les caractères agronomiques les plus hértables, de localiser sur le génome des loci (sites de la molécule d'ADN) associés par proximité à des gènes fortement impliqués dans l'expression de ces caractères. Ces loci, nommés QTLs (Quantitative Trait Loci), hértables à 100 %, pourraient théoriquement être utilisés comme critères indirects de sélection des caractères agronomiques concernés.

Les premiers marqueurs génétiques étaient morphologiques, ou protéiques (isozymes) ; ils ne permettaient de caractériser et de différencier les génomes des individus d'une population que pour un faible nombre de loci, chacun de ces loci ne comportant dans une population qu'un petit nombre d'allèles. Ces premiers marqueurs, relativement peu puissants, ont principalement servi au contrôle de conformité clonale des individus et à l'étude de la diversité génétique des populations. En analysant la transmission des allèles de ces marqueurs d'une génération à une autre, Morgan avait pu réaliser en 1933 la première carte génétique sommaire d'une espèce vivante, la mouche du vinaigre (*Drosophila*).

Les marqueurs génétiques dits « moléculaires » sont des fragments de la molécule d'ADN. Ils correspondent à des loci non codants. Ils sont dits génétiquement « neutres » car ce ne sont pas des gènes, ils n'ont pas d'influence sur l'évolution de l'espèce et l'identification de leurs allèles chez un individu ne dépend pas du tissu étudié ni des conditions de milieu (on peut cependant également utiliser comme marqueurs des sondes de gènes de structure dont l'expression est systématique). Différents types de ces marqueurs ont ainsi été mis au point, notamment les RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism), RAPD (Random Amplified Polymorphic DNA) et les microsatellites ou SSR (Simple Sequence Repeat).

Les marqueurs microsatellites ou marqueurs SSR (« Single Sequence Repeat ») comportent une courte séquence de deux à quatre nucléotides (par exemple –GA–, répétée un nombre variable de fois selon les allèles portés par les individus (par exemple –GAGAGAGAGAGA– = 6 répétitions). Un microsatellite est attaché à un seul locus du génome ; il peut être repéré et amplifié de façon spécifique (technique PCR dite ciblée) grâce à la connaissance et l'emploi comme amorces

d'amplification des deux petites séquences bordant ses extrémités. L'intérêt principal des marqueurs microsatellites est du à leur polymorphisme important (nombreux allèles) et à la relative facilité de réaliser des génotypages (catalogue des allèles présents) sur de grands effectifs grâce à la technique PCR.

Depuis qu'il est devenu possible de disposer d'un grand nombre de ces marqueurs, la démarche de cartographie génétique dite « par déséquilibre de liaison » s'est considérablement développée. Elle repose sur l'étude, dans une descendance, de la part de recombinaison des caractères due aux crossing over (réarrangements intra-chromosomiques réalisés au cours de la méiose). Du fait de ces réarrangements, les allèles de deux loci différents, présents au départ sur le même chromosome, ont une certaine probabilité de se retrouver séparés dans deux gamètes différents (c'est le cas lorsqu'un crossing-over intervient dans l'espace qui les sépare). Il existe des zones de l'ADN (appelées linkats) où se produisent très peu de crossing-over et où se retrouvent conservées les mêmes combinaisons d'allèles pour des loci voisins. La cartographie génétique consiste à analyser la fréquence d'association des allèles respectifs de deux loci, pour tous les couples de marqueurs disponibles. Cela permet de positionner les marqueurs les uns par rapport aux autres, d'identifier les linkats, et de retrouver finalement les « super-linkats » correspondant aux différents chromosomes de l'espèce étudiée. Chaque « distance » entre deux marqueurs est exprimée en pourcentage de crossing-over (1 centi-Morgan = probabilité de 1% de crossing-over lors d'une méiose), ce qui permet de constituer des cartes.

Chez l'hévéa, la démarche de cartographie génétique est appliquée à un minimum de 200 descendants d'un croisement entre deux parents. Chaque descendant est « génotypé » pour les différents marqueurs disponibles, puis l'étude de la stabilité des associations entre allèles des différents marqueurs pris 2 à 2 permettent d'estimer la proximité de ces marqueurs les uns par rapport aux autres, et progressivement de grouper et classer ces marqueurs dans un certain ordre. Les clones descendants du croisement et dont l'ADN a été utilisé pour la cartographie sont installés dans un essai en champ pour une caractérisation agronomique de chacun : le « phénotypage » est la mesure des caractères agronomiques soumis aux effets génétiques et aux effets de milieu. Pour un marqueur comportant n allèles différents au sein du croisement, il est possible de constituer n classes de descendants ayant un même allèle, de comparer les moyennes de ces classes pour les valeurs agronomiques obtenues et de tester la relation éventuelle entre les allèles déterminant ces classes et les valeurs agronomiques des différentes classes. Lorsqu'une relation significative est mise en évidence, on peut identifier les allèles favorables et défavorables du marqueur pour le caractère étudié. On a ainsi localisé grâce au marqueur montrant de telles propriétés un QTL (Quantitative Trait Locus), zone du génome contenant un ou plusieurs gènes importants pour l'expression du caractère étudié. Cette méthode, dite « approche QTL » est une démarche exploratoire efficace surtout pour l'étude génétique de caractères fortement héréditaires donc relativement peu dépendants des effets de milieu et fortement dépendants de un ou quelques gènes majeurs. C'est cette démarche qui a été entreprise dans la sous-composante Genmap du projet Hévéa-Agriculture 3.

1.3. Identification clonale, contrôle de conformité, et analyse de diversité

Depuis le milieu des années 1980, le contrôle de la conformité des clones d'hévéa, permettant de garantir la qualité des processus de multiplication par greffage en recherche ou en développement, était assuré par l'emploi de 13 systèmes isoenzymatiques, protéines dont les variations permettent de distinguer les individus avec un pouvoir résolutif satisfaisant. L'identification par le Cirad entre 1995 et 2000 de près de 300 marqueurs microsatellites, enregistrés dans la banque publique de données Genbank, a permis d'en déduire 16, dont 8 de référence, à l'identification clonale et au contrôle de conformité avec des facilités d'analyse et un pouvoir résolutif beaucoup plus importants.

Lors de deux stages réalisés à Montpellier en 2000 et 2001, Ms Napawan Lekawipat, une jeune chercheuse thaïlandaise du Rrit-Doa, s'est formée au génotypage de l'hévéa par marqueurs microsatellites permettant ainsi l'adaptation des techniques et le transfert de cette technique vers le laboratoire du Rrit, permettant ainsi son utilisation au service de l'hévéaculture thaïlandaise.

Ms Napawan a ensuite entrepris une thèse de Ph.D, soutenue à l'Université de Kasetsart en avril 2004, pour étudier la diversité génétique de l'espèce *Hevea brasiliensis*, en comparant les résultats issus de marqueurs microsatellites « neutres » et de marqueurs de gènes exprimés, de type SSCP (Single Strand Conformation Polymorphism).

La technique SSCP de séparation et de distinction d'allèles repose sur les différences de mobilité, dans un gel d'acrylamide en conditions non dénaturantes, liées à des différences de conformation secondaire de brins simples d'ADN homologues dont certains ont subi des mutations. L'intérêt pour les marqueurs de gènes exprimés repose sur l'idée que ces gènes pourraient à terme être associés à des caractères agronomiques (approche « gènes candidats »). Les séquences des amorces des 17 gènes considérés ont été obtenues sur la base de données publique NCBI. Les gènes retenus étaient :

- FPPS : Farnesyl PyroPhosphate Synthase
- GGPPS : GeranylGeranyl Pyrophosphate Synthase
- HMGR : 3-Hydroxy 3-MethylGlutaryl-CoA Reductase
- IPI : Isopentenyl Pyrophosphate Isomerase
- REF : Rubber Elongation Factor
- Hevein
- Chitinase
- β -1,3-glucanase
- Hevb 3 (Srpp)
- Hevb 5
- Hevb 7
- Hevb 8
- Hevb 10.

Pour les deux techniques (microsatellites et SSCP), l'observation des marqueurs résultait d'une amplification ciblée grâce à des amorces spécifiques par la

technique PCR. 66 accessions amazoniennes sauvages (clones d'hévéa non sélectionnés) et 40 clones cultivés de la population améliorée Wickham ont été étudiés. Sur 12 microsatellites utilisés, 169 allèles ont été observés (de 5 à 21 allèles par marqueur). Concernant les 17 marqueurs de gènes exprimés utilisés, 113 allèles ont été observés (de 4 à 13 allèles par marqueur). Les deux types de marqueurs ont mis en évidence la diversité plus faible des clones cultivés par comparaison avec les accessions sauvages, du fait de leur base génétique plus étroite, et la proximité génétique entre les clones cultivés et les accessions amazoniennes originaires du Mato Grosso. Une séparation claire des trois origines amazoniennes, Acre, Rondonia, et Mato Grosso, a été observée. Ces résultats confirmaient ainsi ceux qui avaient été initialement obtenus au Cirad avec des marqueurs isozymes, puis avec des marqueurs RFLP. Les microsatellites « neutres » ont montré dans cette étude un polymorphisme plus important et donc un pouvoir résolutif plus important que celui des marqueurs SSCP entre les génotypes étudiés.

1.4. Cartographie génétique et approche QTL

Le Cirad avait réalisé la première carte génétique de l'hévéa, principalement avec des marqueurs RFLP, et la première approche QTL sur une famille porteuse d'un système de résistance à la maladie sud-américaine des feuilles (PB260 x RO38), mettant ainsi en évidence un gène majeur de résistance sur le chromosome g13 (thèse de doctorat de Lespinasse 1999). Il a été décidé avec les partenaires thaïlandais de développer cette méthodologie pour l'étude des facteurs de production du latex chez les clones cultivés, notamment pour l'étude des paramètres biochimiques de caractérisation des clones dans la typologie métabolique par le diagnostic latex (composante Genmap du projet Hévéa-Agriculture 3).

La méthode mise en œuvre associe donc la cartographie génétique et une analyse au champ de la famille d'hévéas étudiée (recherche de QTLs associés aux caractères agronomiques mesurés en champ d'essai en Thaïlande).

Le projet comporte les phases successives décrites ci-après.

- a) Réalisation du croisement « modèle » en l'an 2000 par pollinisation manuelle entre deux parents RRIM600 et PB217, qui sont deux clones cultivés représentant deux types métaboliques contrastés : le but est d'une part d'obtenir une large variabilité dans les 334 descendants de ce croisement afin de satisfaire l'objectif scientifique et d'autre part de trouver, parmi ces descendants, des clones combinant des qualités complémentaires.
- b) Génotypage des 334 descendants pour les 267 marqueurs microsatellites disponibles et utilisables. On identifie ainsi pour chaque descendant les deux allèles présents sur un même locus (technique PCR puis électrophorèse). Réalisation entre décembre 2001 et mai 2005.
- c) Cartographie génétique du croisement, par un traitement informatique des données de génotypage des descendants (logiciel Join Map3.0), portant sur

la présence conjointe ou séparée des allèles des différents marqueurs ; les loci correspondant aux différents marqueurs se trouvent ainsi positionnés les uns par rapport aux autres sur chacun des 18 chromosomes de l'hévéa, les distances entre deux marqueurs correspondant au pourcentage de recombinaison (crossing-over) observé entre eux. Réalisation entre décembre 2001 et mai 2005.

- d) Caractérisation en champ entre 2002 et 2010, des principaux caractères agronomiques de 196 descendants, notamment des caractères de croissance et de production de latex, des caractères biochimiques associés aux types métaboliques de la production, et des caractères de qualité du caoutchouc. En cours. Cette démarche devrait être ultérieurement poursuivie par la cartographie de gènes candidats identifiés en physiologie moléculaire de l'hévéa.
- e) Etablissement, par traitement informatique, des classes de descendants associées à chaque allèle de chaque marqueur, calcul des valeurs des caractères agronomiques de ces classes, et identification des loci déterminant une part importante de la variation pour certains caractères (QTLs). A venir.
- f) Extension de l'étude par la répétition de l'essai en champ pour valider la stabilité des QTLs identifiés, et planification de la réalisation de croisements apparentés au croisement étudié par le parent PB217 doté d'une forte spécificité. A venir.

1.4.1. Génotypage et cartographie génétique

En 2001, un contrôle de légitimité des descendants du croisement avait été réalisé par Ms Napawan Lekawipat, lors d'un séjour à Montpellier, à l'aide de 10 marqueurs microsatellites, aboutissant à la sélection de 334 descendants légitimes (c'est-à-dire bien issus des deux parents du croisement).

La plus grande partie du travail de cartographie génétique a été réalisée au Cirad à Montpellier, sous la supervision et avec l'appui scientifique et technique et la participation de l'équipe Cirad, par Ms Kanlaya Prapan, chercheuse du Rrit-Doa sur une durée de 12 mois en 2002, grâce à un financement de la plate-forme de génomique d'Agropolis. Ce travail a été achevé au Cirad à Montpellier pendant les 5 premiers mois de 2005 par Ms Napawan Lekawipat (Rrit-Doa), avec une prise en charge du voyage et des frais d'hébergement par l'Ambassade de France à Bangkok dans le cadre du projet Hévéa-Agriculture n° 3, et des frais de fonctionnement de laboratoire par le Cirad.

En mai 2005, la méthodologie de cartographie employée (utilisation du logiciel Join Map 3.0) aboutissait à la construction de deux cartes parentales (une pour RRIM600 et l'autre pour PB217) et d'une carte consensus intégrant les informations des deux cartes parentales. Les groupes de liaison obtenus ont été mis en relation avec les 18 chromosomes du génome haploïde de l'hévéa en utilisant les marqueurs microsatellites communs à la nouvelle carte obtenue et à la première carte réalisée antérieurement au Cirad sur un autre croisement et dite de référence.

La carte consensus comporte 247 marqueurs microsatellites répartis sur 20 groupes de liaison (18 groupes de liaison pour la carte de RRIM600, soit le nombre de chromosomes du génome haploïde, et 21 groupes de liaison pour la carte de PB217). La comparaison de l'ordre des marqueurs communs aux deux cartes (ancienne et nouvelle) montre que ces marqueurs désignent bien des loci identiques. Pour compléter la saturation de la nouvelle carte génétique (répartition régulière et suffisamment dense de marqueurs le long des 18 chromosomes), 19 combinaisons de marqueurs AFLP ont été génotypés sur les 196 descendants étudiés en champ. Cela a permis d'obtenir une carte consensus avec un total de 445 marqueurs (247 microsatellites et 198 AFLP) répartis sur 18 groupes de liaison correspondant aux 18 chromosomes de base. Seul le groupe g5 peut être considéré comme relativement peu densément cartographié.

1.4.2. Etude en champ (phénotypage)

En juin 2002, 196 clones tirés aléatoirement parmi les 334 génotypes du croisement cartographié ont été plantés en champ sur la station de recherche du Rrit-Doa à Chachoengsao (140 km à l'est de Bangkok), dans un essai d'une surface de 6 ha, avec un dispositif expérimental destiné à contrôler le mieux possible les variations de milieu. Ce dispositif comporte 4 blocs principaux correspondant à 4 répétitions complètes des 196 clones descendant du croisement et des 2 parents RRIM600 et PB217 représentés deux fois (200 unités expérimentales de base). Chaque parcelle clonale de base comporte 4 arbres. Le nombre total d'arbres dans l'essai est donc de 4 arbres x 4 répétitions x 200 unités = 3200 arbres. Ce dispositif est dit en « alpha-plan » car chacun des 4 blocs complets est structuré en 25 sous-blocs incomplets de 8 parcelles clonales, permettant d'estimer non seulement la variation de milieu entre les 4 blocs mais aussi la variation de milieu entre les sous-blocs. Cette méthode permet en principe de réduire la part de variance environnementale et donc d'augmenter l'héritabilité des caractères mesurés.

Depuis le planting de l'essai, un programme intense de mesures et d'observations arbre par arbre est mis en place pour une période de 8 ans allant jusqu'à 2010. La phase la plus importante débutera avec la mise en saignée prévue en 2007 et les mesures de production et de diagnostic latex qui constituent la cible principale de cette recherche. Néanmoins, dès lors que la carte génétique est disponible, tous les caractères agronomiques mesurables et dotés d'une héritabilité suffisante peuvent faire l'objet d'une recherche de QTLs. Il est par ailleurs important de mettre à profit cette recherche, qui donne une opportunité rare d'étudier une seule famille de plein-frères (même père et même mère) en grand effectif, pour réaliser une caractérisation agronomique détaillée de chacun des 196 clones et de leurs parents dans la perspective d'études complémentaires et en vue d'une sélection finale de clones pouvant éventuellement passer au développement.

Sur la période de juin 2002 (planting de l'essai) à décembre 2004 (arbres de 30 mois), les mesures au champ ont principalement porté sur l'évolution de la croissance en hauteur et en circonférence du tronc, ainsi que sur la caractérisation visuelle de la formation architecturale (mode de branchement). De premières

observations concernant la fructification ont été réalisées en juin 2004. De premières observations concernant la précocité de défoliation-refoliation ont été réalisées en janvier 2005. La hauteur moyenne, mesurée à 30 mois sur 2504 arbres, était de 5,20 mètres (coefficient de variation de 14 %, héritabilité de 31 %). La circonférence du tronc à 1 m de hauteur du sol, mesurée à 31 mois sur 2504 arbres, était de 16,8 cm (coefficient de variation de 15 %, héritabilité de 20 %).

2. Ecophysiologie : fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa

2.1. Quelques éléments de bibliographie

Les recherches portant sur le fonctionnement de l'hévéa « plante entière » et sur ses interactions avec l'environnement naturel, hors stress biotiques, étaient encore récemment assez dispersées et masquées par la primauté consacrée :

- à l'anatomie, et au fonctionnement physiologique et biochimique des cellules du tissu laticifère responsable de la production de latex et de caoutchouc naturel,
- aux phases de l'écoulement du latex, de sa coagulation et de sa régénération,
- au rôle de l'hormone végétale « éthylène » comme agent de stimulation de cette production (application d'éthéphon sur l'encoche de saignée), en relation avec le développement des techniques d'exploitation du latex.

C'était particulièrement le cas pour « l'école française » Cirad-Ird représentée principalement par Jean d'Auzac, Jean-Louis Jacob, Hervé Chrestin, et leurs collègues, dont leur partenaire Tchèque, Jaroslav Tupy. Cette démarche française fut prolifique puisqu'elle a conduit à un véritable modèle conceptuel du fonctionnement du tissu laticifère considéré comme un compartiment semi-autonome de l'arbre, et à des résultats essentiels pour le développement tels que le diagnostic latex et la typologie métabolique des clones, qui permettent d'optimiser les systèmes d'exploitation du latex (production des parcelles, productivité des saigneurs).

Les principales recherches portant sur l'assimilation carbonée et sur l'utilisation de l'eau (photosynthèse et transpiration, réponse au stress hydrique) sont dues à des chercheurs tels que Buttery et Boatman (déficit en eau et écoulement du latex, 1976), Ceulemans, Impens, Ng, et Samsuddin (photosynthèse), Chua (sénescence foliaire et abscission), Shorrocks (croissance, 1965), Templeton (partition des assimilats, 1969). Buttery, Boatman, Lustinec, et Resing se sont attachés à caractériser l'aire drainée du tronc lors de l'écoulement du latex d'une saignée, notamment par des suivis cinétiques de la pression de turgescence du laticifère. Narayanan (1970) et Gohet (1996) ont étudié les relations entre croissance du tronc et production de latex.

En 1970, Ninane situait la production de latex dans le cadre des contraintes liées au sol et au climat, dans le contexte de la zone de culture des Terres Rouges du

Cambodge, et il analysait les variations de production à différentes échelles (horaire, journalière, saisonnière) en fonction des variations des facteurs climatiques. Il étudiait les variations des propriétés hydriques de la feuille dans la journée. Après Pike (1941) et Gooding (1952), il a utilisé la microdendrométrie pour étudier la relation entre transpiration et production de latex.

Au cours des années 1980, Monteny (Orstom = Ird) a étudié les interactions végétation-atmosphère dans une parcelle d'hévéa en Côte d'Ivoire. Un bilan d'énergie a été réalisé au dessus de la canopée par la méthode du rapport de Bowen associée au bilan hydrique. Les variations de production de latex sont apparues liées aux variations de la teneur en eau du sol et aux fluctuations de la fraction d'énergie solaire absorbée par le feuillage.

La dynamique de l'émission des unités de croissance et la mise en place de l'architecture de la partie aérienne de l'hévéa a été étudiée (méthodologie Amap, Costes 1990), faisant apparaître, au sein du modèle de Rauh, une typologie de l'architecture des clones. La mise en place de l'architecture du système racinaire a également été abordée en coopération avec l'Inra (Le Roux, Thaler, Pagès). Certaines études physiologiques ont porté sur l'interaction entre porte-greffe et greffon ou sur les possibilités d'induction du branchement.

2.2. Saignée et partition des assimilats

Thèse soutenue le 12 mai 2004 par Unakorn Silpi :

Partition des assimilats hydrocarbonés au niveau du tronc d'hévéas adultes, saignés ou non. Dynamique de fonctionnement des différents puits métaboliques : régénération du latex, croissance radiale du tronc, respiration du tronc, et mise en réserve dans le bois et l'écorce.

Cette thèse visait l'analyse de l'influence de la saignée et de l'écoulement du latex sur le comportement du tronc en termes de croissance, de respiration, d'extension de la zone d'écorce impliquée, et de dynamique de stockage-mobilisation des réserves du bois et de l'écorce.

Les arbres étudiés sont soit saignés, soit non saignés (témoin permettant d'estimer les effets de différents motifs saignés). Pour chaque arbre saigné, on distingue le panneau saigné et le panneau opposé non saigné (le cylindre du tronc étant partagé en deux demi-cylindres appelés panneaux).

- a) Sur 3 clones représentatifs de la typologie métabolique (GT1, RRIM600, PB235), étude de l'extension des effets de la saignée à l'échelle de l'ensemble du tronc par emploi de la méthode du diagnostic latex : le saccharose (Sac) dans le latex est à la fois une source chimique d'énergie mobilisable par l'intermédiaire de la glycolyse, du cycle de Krebs et de la phosphorylation oxydative (respiration), et l'élément de départ pour la synthèse du caoutchouc naturel ; le taux de phosphore inorganique (Pi) est un indicateur de l'intensité de l'activité métabolique au sein du latex qui se traduit notamment par une

consommation de saccharose et par la régénération du caoutchouc naturel exporté par les saignées. L'analyse biochimique des taux de Sac et de Pi dans le latex a été réalisée en différents points du tronc, sur des arbres non saignés, sur des arbres saignés et non stimulés chimiquement, et sur deux motifs d'arbres saignés et stimulés (5 stimulations par an, et 12 stimulations par an).

- b) Sur le clone RRIM600, au moment de la mise en saignée : étude diurne et saisonnière de la croissance du tronc sur 3 motifs : non saigné, saigné non stimulé, et saigné stimulé (2 arbres par motif), réalisée conjointement avec les mesures de respiration. Au total 18 équipements « RS » (Resistance System, relativement peu coûteux et peu encombrant sur les arbres) ont été utilisés : 1 par arbre non saigné, étudié pour validation en comparaison avec un dispositif LVDT (Linear Variable Displacement Transducer) plus précis mais plus encombrant et beaucoup plus coûteux, et 4 par arbre saigné.
- c) Sur les mêmes arbres du clone RRIM600, étude de l'activité respiratoire de l'écorce par emploi d'un dispositif Inra-Piaf constitué de chambres de respiration appliquées sur les troncs, dans lesquelles circule de l'air, avec dosage du taux de CO₂ à l'entrée et à la sortie de chaque chambre par un analyseur infra-rouge, de façon multiplexée (1 chambre par arbre non saigné, et 4 chambres par arbre saigné).
- d) Sur d'autres arbres voisins de la même parcelle RRIM600 et soumis aux mêmes traitements, des prélèvements d'écorce et de bois ont été réalisés à différents niveaux du tronc ainsi que sur le pivot racinaire et sur une branche à 3 mètres de hauteur, en vue d'analyser les taux d'amidon et de sucres solubles (saccharose, glucose, fructose) constituant les réserves carbonées stockées. Ces prélèvements ont porté sur 5 périodes (i/ période suivant la refoliation en mai 2002, ii/ période de pleine production de latex en octobre 2002, iii/ période de totale défoliation au cours de la saison sèche en janvier 2003, iv/ période de refoliation en mars 2003, et v/ période suivant l'arrêt de saignée en avril 2003).

Résultats :

L'utilisation des assimilats est étudiée sur des troncs non saignés ou saignés :

- par une analyse biochimique (Sac et Pi) des différentes zones du tronc,
 - par une étude des microvariations diurnes de diamètre du tronc, et par un suivi de croissance,
 - par une étude de la respiration du tronc,
 - par une analyse des réserves du bois et de l'écorce à 5 périodes de l'année.
- a) La saignée se traduit par une très forte chute du taux de Sac, et par une augmentation du taux de Pi sur l'ensemble du tronc. L'échantillonnage de l'ensemble de la surface du tronc par le diagnostic latex permet de mettre en évidence une augmentation de la surface de l'aire drainée en cas

d'intensification de l'exploitation. L'effet de la saignée est particulièrement marqué sous l'encoche de saignée, mais il est observé aussi dans les zones non directement concernées par la régénération du latex écoulé, et notamment sur toute la surface du panneau opposé non saigné. L'effet de puits de la saignée, et le détournement des assimilats vers la zone d'utilisation nouvelle, est ainsi montré avec une extension qui dépasse les hypothèses antérieures à l'expérience. L'utilisation de valeurs-seuils pour délimiter l'aire drainée permet de montrer la relation forte existant entre l'intensité d'exploitation, la surface de l'aire drainée, et la production de latex.

- b) En l'absence de saignée, la mesure fine des variations de croissance radiale du tronc est apparue comme un bon indicateur de la disponibilité en eau pour les arbres, confirmant des résultats appliqués à l'irrigation des arbres fruitiers, mais cette relation est fortement perturbée par la saignée. La saignée se traduit très rapidement par une chute de la croissance en diamètre du tronc, observée en moins de deux semaines après la reprise de saignée (et suivie par le dispositif RS en 4 positions du tronc). Bien que tout le tronc soit fortement affecté par la réduction de croissance, le suivi fin permis par les équipements RS met en évidence une réduction de croissance plus forte dans la zone principale de régénération située sous l'encoche de saignée.

La croissance en période d'arrêt de saignée de fin de saison sèche est identique pour les motifs saignés et non saigné, ce qui indiquerait l'absence d'arrière-effet de la campagne de saignée précédente sur la croissance des arbres des motifs saignés ; cependant, ces mesures en saison sèche portent sur des croissances très faibles. De même, l'expérience n'a pas permis de mettre en évidence une différenciation de la croissance en relation avec la stimulation, par comparaison de croissances faibles sur les deux motifs saignés, stimulé et non stimulé.

Concernant les variations diurnes, le diamètre maximum est observé tôt le matin, alors que les tissus du tronc sont en pleine turgescence et avant la reprise de la transpiration. Les équipements RS se sont montrés adaptés pour suivre l'évolution de la croissance des troncs, mais inadéquats pour suivre les cycles diurnes de contraction-expansion des troncs en relation avec la transpiration (suivis efficaces seulement avec les équipements LVDT sur les arbres non saignés).

Le suivi diurne permet de distinguer 3 périodes : i/ période défoliée (absence de transpiration, très faibles variations), ii/ après la refoliation, toujours en saison sèche, et avant la reprise de croissance (variations diurnes importantes mais irrégulières en raison des variations de la disponibilité en eau du sol), iii/ période de croissance après reprise des pluies (variations diurnes importantes superposées à la croissance).

- c) Sur une campagne physiologique, on constate une activité respiratoire de l'écorce intense lors de la phase de reprise de végétation accompagnant la reprise des pluies après la refoliation, puis une tendance décroissante, avec

des fluctuations à court terme, jusqu'au minimum d'activité respiratoire atteint lors de la défoliation-refoliation (peu ou pas de croissance). En fait, deux minimums respiratoires sont observés, le premier avant la fin de la défoliation, et le second après la refoliation ; entre les deux, une petite phase de respiration active semble correspondre à la mise en place de la refoliation. Le second minimum d'activité respiratoire après la refoliation pourrait correspondre à une période de stress hydrique précédant la reprise des pluies. Au moment du premier minimum respiratoire, il n'y a pas de croissance, et les arbres non saignés respirent moins que les saignés (- 40 %), la différence pouvant être imputée à la régénération du latex. L'activité respiratoire de l'écorce observée variait dans la gamme de 5-40 nmol de CO₂/min/cm². Chez l'arbre non saigné, on trouve une très forte relation entre l'activité respiratoire de l'écorce et la croissance en diamètre du tronc. Par comparaison avec l'arbre non saigné, la respiration de l'arbre saigné (mesure sous l'encoche) est fortement modifiée et n'est plus en relation linéaire avec la croissance ; à l'échelle journalière, on observe une forte variabilité chez les arbres saignés, et particulièrement chez les arbres stimulés ; on constate un accroissement de respiration d'abord lors de la stimulation, puis lors de la saignée.

- d) Les réserves observées sont principalement constituées d'amidon et de saccharose. On observe la présence de glucose et de fructose en très petites quantités seulement lors de la période de défoliation-refoliation, sans doute en relation avec le processus d'interconversion amidon/sucres solubles.

La mise en réserves se fait pendant toute la saison des pluies (en période d'abondance en assimilats) jusqu'à un maximum atteint lors de la défoliation ; puis, une mobilisation massive intervient lors de la refoliation, provoquant un déstockage : en mars, le taux d'amidon baisse fortement, en relation avec le débourrement des bourgeons (émission de jeunes unités de croissance) et la formation des nouvelles feuilles. Lors de la mobilisation des réserves, le taux de Sac reste inchangé ; le Sac joue donc un rôle tampon et il est produit par hydrolyse de l'amidon selon la demande. La saignée crée un appel d'assimilats qui se traduit au niveau du tronc par une mise en réserve plus importante que chez l'arbre non saigné (quand les conditions d'assimilation photosynthétique sont satisfaisantes). Les observations antérieures de baisse des réserves à proximité de l'aire drainée ne concerneraient donc que les couches superficielles du bois. L'effet de puits créé au niveau du tronc par la saignée permet un afflux d'assimilats utilisés au détriment de la croissance de l'arbre principalement pour la régénération du latex, mais aussi avec une part récupérée pour une mise en réserves accrue.

Les résultats de cette thèse continuent d'être analysés. Au stade actuel de notre réflexion, ils fournissent la représentation suivante :

La saignée, opération « locale » située au niveau du tronc, a un impact « global » sur de nombreux aspects du fonctionnement de l'arbre, et notamment sur la répartition des assimilats carbonés. Les effets s'étendent à des distances plus ou moins importantes de l'encoche de saignée, et dans le cas de la croissance à

l'arbre entier. Un résultat essentiel et inattendu concerne l'augmentation du stockage de réserves amidon dans l'environnement de l'encoche de saignée et de l'aire drainée du fait de l'appel d'assimilats provoqué vers cette zone par la saignée.

L'évolution n'avait pas « prévu », chez l'hévéa, la saignée artificielle : l'existence de réserves ne suffit pas à compenser l'exploitation qui se traduit donc très rapidement par une réduction de la croissance de l'ensemble de l'arbre (détournement d'assimilats). En revanche, après la défoliation et en l'absence de croissance, la mobilisation massive des réserves permet une refoliation rapide. Alors que la respiration est en relation stable avec la croissance de l'arbre non saigné, la saignée représente logiquement une perturbation métabolique importante qui modifie fortement la respiration, selon un processus qui reste à interpréter. On attend en effet une respiration accrue par la saignée. Cependant, la respiration est délicate à interpréter car la mesure du CO₂ respiratoire est un facteur très sensible à la température instantanée, et dont l'observation peut de plus être biaisée par des remontées de CO₂ provenant du système racinaire ; il semblerait finalement que ce biais est faible et peu significatif. La saignée a, sur le moyen terme, un effet de dilution du Sac du latex sur une zone qui dépasse largement l'aire de drainage et de régénération (définie précisément par des seuils empiriques) : cette dilution s'installe sans doute progressivement au cours des saignées successives par des processus de ré-équilibre entre les différentes régions du tissu laticifère, qui l'emportent manifestement en rapidité sur les possibilités de rechargement du laticifère en Sac. En revanche, l'afflux d'assimilats vers la base du tronc, en période de photosynthèse active, induit par l'effet de puits de la saignée et véhiculé par la sève élaborée puis déchargé dans l'apoplaste de l'écorce du tronc, apparaît partiellement récupéré par le processus de mise en réserve sous forme d'amidon, peut-être du fait d'une adaptation visant à répondre à la nouvelle irrégularité de fonctionnement que fait apparaître la saignée.

Le clone PB235, par ses caractéristiques (forte croissance avant saignée, réponse rapide et cohérente à l'intensification de l'exploitation, épuisement également rapide), semble être un modèle d'étude plus démonstratif que les autres clones. L'adjonction au diagnostic latex classique (prélèvement unique sous l'encoche de saignée) d'un second point de prélèvement situé à une distance standard du point de référence traditionnel, ou sur une position haute du panneau opposé au panneau de saignée serait susceptible d'apporter une information différentielle entre deux zones de tronc, et d'estimer l'extension de l'impact de la saignée sur le tronc.

2.3. Modélisation du fonctionnement hydrique et carboné de jeunes hévéas

Thèse soutenue le 12 mai 2004 par Krissada Sangsing :

<i>Modélisation du fonctionnement hydrique et carboné de jeunes hévéas de un an et demi, soumis ou non à un stress hydrique.</i>
--

Cette thèse portait sur l'analyse du fonctionnement photosynthétique et hydrique de jeunes arbres non saignés d'un an et demi, cultivés en conteneurs de 150 litres, dans des conditions d'alimentation en eau non limitantes, ou en conditions de stress hydrique. Reproduisant sur hêvea en Thaïlande une démarche développée par l'Inra-Piaf sur noyer, la thèse utilise des modèles très classiques à l'échelle de la feuille (Farquhar pour la photosynthèse, et Jarvis pour la conductance stomatique), et estime les paramètres nécessaires pour différentes simulations. Ces paramètres sont ensuite utilisés pour le passage de la modélisation à l'échelle de l'arbre entier.

La thèse comportait les 6 parties suivantes :

- a) Paramétrisation du modèle biochimique de photosynthèse de Farquhar, et du modèle de conductance stomatique de Jarvis, pour des feuilles d'hêvea (clones RRIM600 et RRIT251). Les plants bénéficiaient d'une alimentation hydrique non limitante.

Mesure de l'assimilation nette (A), de la conductance stomatique (g_s), de la pression partielle de CO_2 (C_i), dans les chambres sous-stomatiques ; établissement de courbes $A-C_i$ et estimation des valeurs V_{max} (taux de carboxylation maximale), et J_{max} (capacité de transport d'électrons) ; estimation de la respiration foliaire en phase obscure R_d ; mesure de la surface et du poids sec de chaque feuille ; analyse de la concentration d'azote totale de chaque feuille.

Mesure de la conductance stomatique de référence g_{sref} ; mesure de la surface spécifique et de la teneur en azote de chaque feuille ; étude de la réponse de g_s à Q (rayonnement), T_l (Température de la feuille), D (déficit de pression de vapeur d'eau à la surface de la feuille), et C_s (concentration de l'air en CO_2 à la surface de la feuille).

- b) Evaluation de la capacité photosynthétique de deux clones (PB260 et PB217), et effet d'un stress hydrique sur les échanges gazeux foliaires. Expérience réalisée en France à l'Inra-Piaf.

Comparaison d'un motif normalement alimenté en eau et d'un motif soumis à un stress hydrique. Mesure de A , g_s , C_i ; mesure de la fluorescence de la chlorophylle ; mesure du taux de chlorophylle, de la surface foliaire, du poids de matière sèche, et de la concentration en azote des feuilles.

Au cours du stress hydrique, mesure de A , g_s , et E (taux de transpiration) ; calcul du WUE (efficacité d'utilisation de l'eau) ; suivi quotidien du potentiel hydrique foliaire au cours de l'expérience.

- c) Une première expérience comparait 5 clones pour l'influence de la position de la feuille ou d'un foliole au sein d'une unité de croissance sur le taux de respiration et l'intensité de coloration de la feuille (SPAD). Une seconde expérience comparait 4 clones pour le taux de respiration de la feuille avec une partition entre respiration de maintenance et respiration de croissance. Une

équation adaptée de celle d'Amthor (1988) permet d'exprimer la respiration en phase obscure dans ses deux composantes de maintenance et de croissance de la surface de la feuille. Etude en conditions hydriques non limitantes.

Suivi quotidien de la croissance des feuilles ; mesures de respiration ; mesure du taux de chlorophylle des feuilles. Mesure de la respiration en phase obscure R_d

- d) Etude de l'embolie du xylème et de la régulation stomatique chez l'hévéa (clones RRIM600 et RRIT251, arbres de un an et demi, 5 arbres par clone ayant subi un arrêt d'arrosage depuis 0, 1, 2, 3, et 4 semaines). Pour différentes positions du xylème (branche, pétiole, nervure médiane de foliole), l'embolie consécutive à un stress hydrique est estimée par une technique hydraulique selon la méthode décrite par Sperry (1988) : la conductivité hydraulique pour un gradient de pressions appliquées à un flux d'eau est mesurée (mesure des débits d'eau traversant l'organe), puis on élimine l'embolie par une surpression et on mesure la conductivité sans embolie ; on établit ensuite des courbes de vulnérabilité à l'embolie. L'équipement Xyl'Em (brevet Inra-Piaf) a été utilisé.
- e) Etude des relations entre la conductance hydraulique du xylème et la croissance (clones RRIM600 et RRIT251). Mesures de segments de xylème par l'équipement Xyl'Em. Mesures des caractéristiques hydrauliques de branches entières par l'équipement HPFM (High Pressure Flow Meter), et calcul des résistances hydrauliques des branches entières.
- f) Utilisation des modèles RATP (Radiation, Assimilation, Transpiration, and Photosynthesis) en l'absence de stress hydrique, et RER (Regulation, Embolism, Resistance) avec stress hydrique pour simuler la photosynthèse et la transpiration.

Clone RRIT251, 2 arbres étudiés, dont l'un est soumis à un stress hydrique. Estimation de la surface foliaire de chaque arbre, par emploi d'une relation allométrique pour estimer la surface de chaque feuille. Les 2 arbres ont été digitalisés avant l'introduction du stress hydrique sur l'un d'entre eux (arrêt de l'arrosage pendant 30 jours). La transpiration est déduite de mesures de flux de sève au niveau du tronc.

RATP simule la distribution spatiale de la photosynthèse et de la transpiration dans une canopée complexe en l'absence de stress hydrique. RER simule la transpiration en situation de stress hydrique.

Résultats :

- a) Paramétrisation des modèles de Farquhar et de Jarvis. Les modèles de Farquhar (photosynthèse) et de Jarvis (conductance stomatique) ont été paramétrés pour l'hévéa. Les paramètres-clés de ces modèles, le taux de carboxylation maximum (V_{cmax}), la capacité de transport des électrons (J_{max}), et le niveau de respiration en phase obscure (R_d), ont été estimés à partir de

relations établies entre les mesures des échanges gazeux et les paramètres climatiques au niveau de la feuille. Ces paramètres-clés se sont montrés corrélés avec la concentration d'azote dans les feuilles qui peut également être estimée par la mesure SPAD de l'intensité de coloration des feuilles (teneur en chlorophylle) associée au poids spécifique des feuilles.

Parmi les corrélations obtenues entre la conductance stomatique et les paramètres Q, TI, D, et Cs (rayonnement, température de la feuille, déficit de pression de vapeur d'eau à la surface de la feuille, et concentration de l'air en CO₂ à la surface de la feuille), l'influence de la température de la feuille sur la capacité photosynthétique, et surtout sur la conductance stomatique, est apparue particulièrement importante : une variation de 2 degrés autour de l'optimum de température réduirait la conductance stomatique de moitié.

Les différences observées entre clones concernant l'efficacité d'utilisation de l'azote des feuilles, ou la réponse de la conductance stomatique à la température à la surface de la feuille, sont des éléments qui peuvent contribuer à expliquer les différences de croissance observées au jeune âge entre les grands clones connus.

Ces modèles ont permis une bonne prédiction de l'assimilation photosynthétique et de la conductance stomatique à l'échelle d'une feuille, et une simulation a montré que ces modèles pouvaient être utilisés chez l'hévéa à l'échelle d'une branche, de la canopée, ou d'un arbre individuel d'âge équivalent aux arbres des expériences.

- b) Stress hydrique, assimilation, et transpiration : comparaison de deux clones. Le taux d'assimilation nette et l'efficacité d'utilisation de l'azote ont été trouvés plus importants chez PB260 que chez PB217. Cependant, les taux de respiration, la fluorescence de la chlorophylle, l'efficacité d'utilisation de l'eau, l'intensité de coloration des feuilles (mesure SPAD) n'étaient pas différents entre les deux clones. Le stress hydrique a provoqué la fermeture des stomates, une transpiration plus faible et une assimilation réduite, mais une plus grande efficacité d'utilisation de l'eau : après 14 jours sans arrosage, la conductance stomatique et la transpiration étaient réduites de 80 à 85 %, tandis que la photosynthèse n'était réduite que de 60 à 70 %. Le stress hydrique a aussi réduit le potentiel hydrique foliaire qui était positivement corrélé à la conductance stomatique.
- c) Respirations de maintenance et de croissance, et croissance en surface d'une feuille. La position des feuilles et des folioles dans une même unité de croissance ne changeait pas la respiration et l'intensité de coloration des feuilles. Une relation positive forte a été trouvée entre respiration en phase obscure et taux de croissance relative de la feuille. Des différences entre clones ont été trouvées pour le coefficient de maintenance. L'influence de la température sur la respiration de la feuille reste à approfondir.
- d) Vulnérabilité à l'embolie, comparaison d'organes et de clones. Le xylème de l'hévéa apparaît relativement vulnérable à l'embolie, ce qui semble être le cas fréquent chez les arbres à feuilles caduques des tropiques humides. Des

différences de sensibilité importantes ont été trouvées entre les organes (les branches sont les plus vulnérables ; les nervures centrales de feuilles sont moins vulnérables). Une différence importante a été trouvée entre les deux clones au niveau des pétioles des feuilles (RRIT251 est plus sensible à l'embolie que RRIM600). Les observations conjointes de la perte de conductance hydraulique du xylème et de la conductance stomatique confirment l'idée que les stomates ne se ferment que peu avant le déclenchement possible d'embolies, permettant ainsi de maintenir la transpiration et l'assimilation le plus longtemps possible au cours d'une phase de stress hydrique.

- e) Modélisation de l'assimilation et de la transpiration à l'échelle de 2 plantes entières, dont 1 plante soumise à stress hydrique. Le modèle RATP a fourni une bonne prédiction de la photosynthèse et de la transpiration du jeune hévéa non stressé à l'échelle de l'ensemble de la canopée. Le modèle RER a fourni une bonne prédiction de la transpiration de l'arbre stressé (1 arbre non stressé et 1 arbre stressé par arrêt de l'arrosage le 14 juin 2003, au début d'une expérience de 30 jours).
- Comme chez le noyer, RATP a sous-estimé les pointes d'assimilation apparues au cours de la journée de validation (journée avec ciel couvert du 6 juillet 2003).
 - Le potentiel hydrique minimum du xylème est comparé au potentiel de base (« predawn ») pendant les 30 jours de l'expérience : chez l'arbre stressé, on constate un décrochage du potentiel hydrique minimum après 15 jours et une baisse régulière jusqu'à la fin de l'expérience (manifestation d'un stress hydrique croissant) ; alors que le potentiel de base baisse légèrement et de façon linéaire au cours de l'augmentation de la transpiration cumulée, le potentiel minimum chute de plus en plus rapidement et de façon très importante ; la transpiration s'est arrêtée au potentiel minimum de -2 MPa. Après 15 jours, RATP n'est plus capable de prédire correctement le taux de transpiration maximale chez l'arbre stressé (RATP ne rend pas compte de la baisse régulière de ce taux et le surestime de plus en plus).
 - RATP a simulé correctement la transpiration maximale en l'absence de stress hydrique, tandis que RER l'a simulée correctement sur l'arbre stressé à partir de 22 jours après l'arrêt de l'arrosage, c'est à dire à partir d'un certain niveau de stress et en dessous d'un certain seuil de transpiration ; une fonction globale de simulation de la transpiration maximale, conservant pour chaque simulation la valeur minimale obtenue (celle de RATP ou celle de RER), fournit une bonne simulation des mesures réalisées sans ou avec stress hydrique sur la durée complète de l'expérience (30 jours); comme chez le noyer, les valeurs simulées sont le plus souvent un peu supérieures aux valeurs mesurées.

2.4. Dynamique de formation et de remobilisation des réserves

Thèse initiée à partir de 2002 par Ms Pisamai Chantuma (chercheuse Rrit-Doa) :

Dynamique de stockage dans le bois et l'écorce et de remobilisation des réserves hydrocarbonées, selon les variations saisonnières et annuelles et selon l'intensité d'exploitation de l'hévéa. Hydrolyse des amidons présidant à la remobilisation des réserves sous forme de sucres solubles.

Dans une perspective de modélisation du fonctionnement de l'hévéa saigné, l'utilisation des assimilats hydrocarbonés issus de la photosynthèse (sucre) par différents puits physiologiques joue un rôle central. La place des sucres est particulièrement importante chez l'hévéa où le tissu laticifère soumis à la saignée et à un forçage d'activité par la stimulation éthylénique constitue un gros consommateur de sucres et procède de fait à un véritable détournement métabolique des assimilats pour la production d'énergie et de caoutchouc. Une hypothèse jusqu'ici courante consistait à penser que la production de caoutchouc naturel puisait en partie dans les réserves accumulées dans le bois à proximité de l'aire drainée par la saignée. Par ailleurs, les processus annuels de défoliation-refoliation, de floraison et de fructification supposent une dynamique de mise en réserve et de remobilisation de réserves. La question scientifique des compétitions entre les différents puits pour l'allocation des assimilats hydrocarbonés et des priorités d'allocation se pose particulièrement concernant les réserves stockées et donc en principe disponibles pour différentes utilisations.

Poursuivant l'étude abordée par Unakorn Silpi, cette recherche vise donc à quantifier et localiser les réserves hydrocarbonées chez l'hévéa saigné, à déterminer leur disponibilité pour les différents puits, à suivre leur évolution au cours de plusieurs années en relation avec des systèmes de saignée d'intensités différentes et en relation avec les variations climatiques et le cycle phénologique annuel des hévéas.

Une première phase d'analyse avait été réalisée sur des arbres non saignés et des arbres saignés à simple encoche, stimulés ou non, dans le cadre de la thèse de Ms Unakorn Silpi. Le dispositif expérimental utilisé par Ms Pisamai Chantuma est constitué par les deux essais à double encoche de saignée (système DCA, voir paragraphe 3 ci-après), étudiés en comparaison avec le système de saignée standard de l'hévéa en Thaïlande (saignée tous les deux jours et non stimulée) et un motif à simple encoche saigné tous les 3 jours et stimulé. L'amidon stocké dans le bois du tronc s'est révélé être le mode de mise en réserve prédominant. Les premiers résultats ont montré une influence très forte de la position et du nombre d'encoches de saignée sur la répartition de l'amidon dans le bois à différentes hauteurs du tronc, perturbant le gradient vertical naturel de concentration (gradient décroissant de la teneur en amidon du bois avec la hauteur depuis la base du tronc. Une accumulation d'amidon se produit tout au long de la phase de saison des pluies avec un prolongement sur le début de la saison sèche. La dynamique de stockage d'amidon au voisinage des encoches de saignée est encore en cours d'étude. Enfin, on constate un déstockage d'amidon particulièrement important au moment de la refoliation, vers janvier-février.

Hydrolyse de l'amidon et exportation de sucres solubles

Le sujet de recherche de la thèse en cours a été approfondi par une approche de l'étude des processus biochimiques impliqués dans le déstockage de l'amidon du

bois. Il était intéressant d'analyser l'activité des amylases totales et des α -amylases impliquées dans l'hydrolyse de l'amidon, ainsi que celles de la sucrose-phosphate-synthase (SPS) et de l'invertase des parois cellulaires qui contrôlent la formation de saccharose à partir de formes de sucres plus simples. Un stage de 2 mois de Ms Pisamai Chantuma au laboratoire de l'Umr Piaf à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand lui a permis d'adapter la méthode d'analyse à l'hévéa en vue d'un transfert de cette méthode au laboratoire de Chachoengsao en Thaïlande. Au cours de ce stage, les mesures d'activité de ces enzymes ont été réalisées sur 2 clones (PB235 et RRIM600) et 4 types d'échantillons (bois frais, écorce fraîche, bois sec et écorce sèche). La poursuite de cette recherche doit viser à la recherche d'une relation entre l'activité de ces enzymes et la saignée des arbres.

2.5. Discussion sur les résultats obtenus en écophysiologie

Le laticifère a pu être étudié quasiment seul, comme un compartiment semi-autonome de l'arbre. Cependant, l'élargissement de la problématique physiologique de l'hévéa, du laticifère jusqu'au niveau de parties plus ou moins grandes de l'arbre, voire de l'arbre entier (modélisation RATP et RER) correspond bien à une plus grande prise de conscience des interactions entre le laticifère et la plante entière du point de vue de l'assimilation et de l'utilisation de carbone, en relation étroite avec l'utilisation de l'eau. Le détournement de carbone par la saignée est massif et réduit considérablement la croissance de l'arbre ; l'exportation d'eau par la saignée est négligeable, mais l'écoulement du latex est très fortement dépendant d'un accès facile à l'eau.

Par ailleurs, la relance de cette recherche écophysiologique sur l'hévéa répond au souci de prendre en compte de nouveaux enjeux pour l'hévéaculture :

- adaptation à des zones climatiques plus difficiles
- développement économique de la valorisation du bois d'hévéa
- évaluation de la valeur environnementale de l'hévéaculture (une forêt cultivée), notamment par la formation de biomasse utile aux sols et à la séquestration de carbone atmosphérique.

Par comparaison avec l'antagonisme entre croissance et production de latex, l'importance quantitative de la respiration et des réserves amidon reste à préciser, mais on a déjà abordé la prise en compte de phénomènes importants pour la vie de l'arbre tels que l'alternance entre saison sèche et saison des pluies, et la réalisation du processus de défoliation-refoliation en saison sèche. Les modélisations réalisées permettent déjà de se faire une représentation quantitative du fonctionnement des arbres, et l'appropriation de ces méthodes par des chercheurs travaillant auprès des hévéas devrait permettre de les appliquer à une gamme étendue de clones pour tenter de relier leur comportement à des explications éco-physiologiques cohérentes. Cela devrait permettre de mieux comprendre quels clones d'hévéa ont les comportements physiologiques les plus favorables.

Le physiologiste propose généralement directement ses résultats au sélectionneur pour applications. Cependant, la complexité du fonctionnement global masque

souvent les événements particuliers identifiés par le physiologiste ; de plus, la sélection sur un critère peut considérablement entraver le processus de sélection sur les autres critères. En revanche, l'explication de plus en plus fine du comportement des clones les plus utilisés peut permettre, à court et moyen terme, des adaptations de choix de clones et de pratiques culturales en fonction des contextes pédo-climatiques. Le sélectionneur reste cependant intéressé par les méthodes proposées et peut commencer à les tester notamment sur les clones exprimant des comportements extrêmes au sein de la variabilité des populations.

Les deux thèses sont reliées par la thématique commune de la gestion du carbone et de l'eau par l'hévéa. Chacune occupe cependant une phase spécifique de l'exploitation d'une parcelle :

- la phase immature pour la thèse portant sur les jeunes arbres non saignés en croissance
- la phase de saignée pour la thèse portant sur les troncs d'arbres adultes.

L'étude réalisée sur les arbres jeunes peut être vue comme un préalable à une application à des arbres adultes. Mais elle est intéressante en soi pour l'optimisation de la croissance immature, notamment en situation climatique difficile. La croissance immature est en effet principalement limitée par le stress hydrique. Concernant l'hévéa, il ne s'agit pas de rechercher une résistance permettant la survie des plants, dans la phase qui concerne les 8 premiers mois après planting, où le problème est solutionné par le remplacement des très jeunes plants morts. Il s'agit surtout d'identifier les mécanismes physiologiques qui permettent la meilleure croissance possible compte tenu des stress hydriques imposés par le milieu, afin d'atteindre la taille de mise en saignée le plus rapidement possible (l'âge de mise en saignée varie actuellement entre 4 et 10 ans selon les contextes écologiques !). Le changement d'échelle (passage de la feuille à la canopée de l'arbre entier) réalisé pour la modélisation de l'assimilation et de la transpiration ne vaut que pour des arbres jeunes tels que ceux de l'étude, mais cela est donc en fait déjà très intéressant.

De même pour l'arbre saigné, il s'agit d'identifier des clones capables de gérer à l'économie l'assimilation et la respiration pour atteindre le meilleur compromis économique possible entre croissance et production de latex. De la compréhension fine du fonctionnement du tronc de l'hévéa saigné, on peut aussi espérer tirer de nouvelles idées pour améliorer la gestion pluriannuelle de l'exploitation, ou des indicateurs permettant de prévoir des périodes de saignée sous-productive.

3. Optimisation des systèmes de saignée

La démarche d'optimisation des systèmes de production de latex est l'une des principales utilisatrices des résultats des recherches sur la physiologie de l'hévéa.

3.1. Le contexte des plantations thaïlandaises

L'hévéaculture thaïlandaise est dominée par l'importance des petites plantations dites paysannes, familiales ou villageoises, avec une très petite surface moyenne d'environ 1.70 hectare. Des systèmes de saignée très intensifs sont pratiqués avec des fréquences de saignée élevées (deux fois tous les 3 jours, ou trois fois tous les quatre jours, ou 5 jours sur 6, ou tous les jours), et avec des encoches de saignées souvent réduites à un tiers de spirale. La petite surface de la plantation conduit le planteur à saigner tous ses arbres en un seul jour, ce qui permet cette intensité de saignée. De ces pratiques résultent une faible productivité du travail, des taux d'encoche sèche élevés et une faible durée de vie des plantations. D'un point de vue physiologique, ces saignées très fréquentes laissent un temps insuffisant pour la régénération du latex entre deux saignées, se traduisent par de faibles taux de sucre disponible dans le système laticifère qui ne permettent pas l'emploi de la stimulation éthylénique, et rendent impossible le développement de la saignée inversée qui est généralement très productive.

L'étude des systèmes de saignée de l'hévéa est structurée par le concept de typologie métabolique des clones qui prend en compte la capacité de régénération du latex (mesurée partiellement par le taux de caoutchouc sec du latex), la disponibilité en saccharose dans le tissu laticifère pour la fourniture d'énergie et la production de caoutchouc, le taux de phosphore inorganique qui rend compte de l'intensité de l'activité métabolique dans le laticifère, et le taux de groupements thios qui reflète la disponibilité en anti-oxydant glutathion et rend compte partiellement de la capacité du laticifère à détoxifier les radicaux libres toxiques issus d'un métabolisme intense (résistance au stress oxydatif). Ces 4 paramètres, biochimiques DRC, SAC, PI et RSH sont mesurés dans le cadre du diagnostic latex. Ils permettent notamment de distinguer d'une part les clones à métabolisme actif, consommant rapidement le saccharose et répondant peu à la stimulation éthylénique, et d'autre part les clones à métabolisme lent mais dotés de réserves importantes en saccharose et répondant fortement à la stimulation.

3.2. Expérimentation de systèmes de saignée

Pour étudier les possibilités d'optimiser les systèmes de saignée, 13 essais en champ ont été installés en 1999 et 2000 sur la station du Rrit-Doa à Chachoengsao :

- 8 de ces essais ont porté sur les 6 clones RRIM600, PB235, GT1, BPM24, PR261 et RRIC110. Ils ont permis de préciser les valeurs de référence pour l'utilisation du diagnostic latex dans les conditions locales, et de caractériser le type métabolique et le potentiel de production de chaque clone par une étude de leur réponse à une fréquence croissante de stimulation. Certains de ces essais ont aussi servi à estimer de façon macroscopique l'impact dépressif de la saignée sur la croissance du tronc (antagonisme entre les deux processus) et la formation de biomasse totale par arbre au cours de la saignée sur 3 clones.
- 1 essai portait sur l'optimisation de la durée du repos de saignée pendant la saison sèche en condition climatique sub-optimale (longue saison sèche). La

période d'arrêt de saignée combinée à la longueur de l'arrêt de saignée ont été étudiées conjointement. Il est apparu important d'arrêter la saignée pendant la refoliation annuelle en février (les hévéas perdent et reforment leurs feuilles chaque année en fin de saison sèche, et pendant les mois de mars et d'avril qui sont les plus chauds de l'année).

- 1 essai portait sur l'évaluation de la productivité de la saignée inversée chez le clone RRIM600 qui représente plus de 80 % des surfaces d'hévéa en Thaïlande. Un standard (saignée inversée non stimulée en demi-spirale tous les deux jours) a été comparée à une saignée inversée et stimulée en quart de spirale tous les 3 jours, et à une saignée inversée et stimulée en tiers de spirale tous les 2 jours.
- 1 essai portait sur la validation de la stimulation par de l'éthylène gazeux (la stimulation éthylénique est normalement appliquée par badigeonnage sur l'encoche de saignée d'éthéphon générateur d'éthylène). Cet essai a en fait conduit à un résultat négatif du fait de l'absence de durabilité de la productivité élevée initiale. Les problèmes constatés ont été des fuites de gaz et une trop importante consommation de gaz, et une forte dégradation des écorces dans les zones stimulées.

2 essais d'amélioration de la productivité de la saignée. Ces deux essais ont été conduits sur le clone RRIM600, l'un à petite échelle (suivi arbre par arbre) et l'autre à grande échelle (100 arbres par traitement étudié), et ont servi de support expérimental au travail de thèse de Ms Pisamai Chantuma portant sur l'étude de la dynamique de formation et de remobilisation des réserves en amidon dans le bois des arbres. Cette expérimentation est commentée ci-après.

3.3. Amélioration de la productivité des arbres et de la saignée

Le concept de base de l'amélioration de la productivité du travail de la saignée consiste à réduire la fréquence de saignée (passer d'une saignée tous les 2 jours à une saignée tous les 3, 4 ou 5 jours voire une saignée hebdomadaire), moyennant l'application d'une certaine fréquence de stimulation éthylénique pour limiter la perte de production par arbre. En limitant cette perte de production à 15 % maximum, on obtient généralement, selon les coûts de main d'œuvre et le prix du caoutchouc, un bilan économique très positif. La réduction de fréquence de saignée a également pour avantage une réduction de la consommation d'écorce par la saignée, ce qui permet une augmentation de la durée possible de saignée sur écorce vierge et une plus longue durée de saignée inversée.

Cette approche est peu attractive pour le petit planteur thaïlandais dont l'objectif n'est pas d'améliorer la productivité de son travail mais d'obtenir le revenu le plus élevé possible de sa très petite plantation.

Une stratégie adaptée a donc été envisagée, consistant à réaliser simultanément deux encoches de saignée à deux hauteurs du tronc, et à les saigner alternativement. Chaque encoche est ainsi saignée tous les 4 jours, mais l'arbre est saigné tous les 2 jours. Cette approche permet d'augmenter la durée de régénération du latex entre deux saignées pour chaque encoche (on sait en effet

que la régénération complète du latex dans l'aire drainée d'une encoche de saignée nécessite entre 3 et 5 jours. Cela rend possible l'emploi de la stimulation éthylénique dans le cadre d'une saignée tous les 2 jours équivalente en terme de quantité de travail au standard pratiqué en Thaïlande. Ce système a été nommé « Double Cut Alternative (DCA) ». Les deux encoches ont été initiées sur chacun des deux demi-panneaux opposés du tronc de l'hévéa, respectivement à 0.75 m et 1.50 m de hauteur sur le tronc. Un suivi de croissance et un suivi physiologique par le diagnostic latex ont été assurés pour les deux encoches de chaque traitement.

Les trois premières années d'expérimentation du système DCA en Thaïlande ont montré une augmentation de la production par arbre d'environ 25 % par comparaison avec le témoin encoche simple demi-spirale saigné tous les 2 jours, ainsi qu'une augmentation de 25 % de la productivité du travail. Ces résultats sont obtenus sans emploi de la stimulation ; il est apparu néanmoins possible d'optimiser la production par application de la stimulation sur l'encoche la plus haute. Ce système présente cependant des contraintes en terme de gestion des panneaux de saignée, et nécessite une évaluation de sa durabilité sur un plus grand nombre d'années.

4. Etude de la qualité du caoutchouc naturel

Cette composante du projet a été mise en place à partir d'octobre 2002. Elle répond à une forte demande de l'Université de Kasetsart pour la production de résultats utiles à l'industrie de seconde transformation (la première transformation ne concerne que le séchage et le conditionnement du caoutchouc naturel). La Thaïlande, premier producteur agricole de caoutchouc naturel, a en effet pour ambition logique de transformer industriellement une part croissante de sa production afin de conserver une part accrue de la valeur ajoutée permise par l'hévéaculture.

4.1. Le projet d'étude de la qualité du caoutchouc naturel

Le caoutchouc naturel dispose par rapport à ses concurrents directs, les élastomères de synthèse, de propriétés spécifiques inégalées qui expliquent un marché en constante augmentation en valeur absolue et le maintien d'une part de 40 % en valeur relative de l'ensemble des élastomères. En 2004, la Thaïlande, leader des pays producteurs, a produit 2,9 millions de tonnes de caoutchouc naturel, ce qui représente 35 % de la production mondiale.

Cependant, le caoutchouc naturel, en tant qu'agro-matériau soumis aux variations de nombreux facteurs biologiques, a pour inconvénient un certain défaut de régularité pouvant conduire à des difficultés d'usinage. Aujourd'hui, les systèmes de spécification nationaux (STR, SMR, SIR, etc.) ou le système international (ISO 2000) sont insuffisants pour prédire le comportement en usinage du caoutchouc naturel. On cherche donc à mettre au point de nouveaux indicateurs pertinents de prédiction de comportement, visant à renforcer la compétitivité du caoutchouc naturel. Les composés non isoprène du caoutchouc naturel, et notamment les

lipides qui représentent jusqu'à 5 % du produit, sont des éléments clé de la qualité et constituent donc des objets prioritaires d'investigation.

La stratégie du projet de recherche comporte 3 étapes :

- mises au point de méthodologies qualitatives et quantitatives concernant la collecte de latex, l'extraction de molécules, la séparation et l'analyse
- étude des relations entre la composition lipidique et les niveaux de méso et de macro-structure, étude du comportement en usinage, notamment concernant la mastication
- étude de l'influence de facteurs externes sur la qualité, soit de facteurs agro-écologiques soit de facteurs de post-récolte du latex.

Le laboratoire installé au KAPI (Kasetsart) est donc principalement dédié à l'extraction et l'analyse des lipides (notamment chromatographie en phase gazeuse). Pour la collecte d'échantillons adéquats, un atelier de production de feuilles de caoutchouc a été monté sur une plantation partenaire accueillant par ailleurs différents essais de saignée.

D'autres sujets d'intérêt ont été identifiés avec d'autres partenaires (Prince of Songkhla University) dans la perspective d'une extension du projet, tels que l'étude des mécanismes de maturation du latex concentré ou l'amélioration de la résistance du caoutchouc naturel à la thermo-oxydation.

Le projet a accueilli 2 étudiants de Kasetsart University en 4^{ème} année de Bachelor :

- Chutiwan Nimitmai : étude de la teneur du latex de RRIM600 en hytosterol libre
- Jirawat Chedchan : composition en acides gras de l'huile de J. Curcas.

Une recherche de niveau Master (Daranee Visitnontachai) a été réalisée sur la caractérisation des composés non isoprène et leurs effets sur les propriétés de mélangeage du caoutchouc naturel brut (non vulcanisé). Un projet de thèse de Ph.D. a démarré sur ce thème en 2004 (Siriluck Liengprayoon).

4.2. Premiers résultats portant sur la méthodologie

Sur la période 2003-2004, le travail a concerné principalement l'étape de mise au point méthodologique :

- Optimisation de l'extraction du caoutchouc sec, visant à séparer les lipides du polyisoprène, et portant sur le procédé de broyage, la nature des solvants et la durée de leur application. Le broyage du caoutchouc augmente le taux d'extraction dans tous les cas étudiés. Le mélange chloroforme-méthanol (2 :1) a donné le meilleur taux d'extraction des lipides. Une étude de cinétique d'extraction a été réalisée, confirmant ces résultats et permettant la définition d'une procédure d'extraction du caoutchouc sec.
- La démarche a également été appliquée à l'extraction sur latex afin de tester l'effet stabilisateur de l'ammoniaque (empêchant la coagulation) et la durée d'extraction. Il est apparu que la qualité des lipides extraits évoluait rapidement avec le temps séparant l'extraction de la saignée, ce qui a conduit à

décider de réaliser l'extraction aussi vite que possible, c'est-à-dire au champ, juste après la saignée et sans emploi de stabilisant. L'étude de différentes durées d'extraction n'a pas montré de différence significative, ce qui indique que l'extraction provenant du latex est quasiment instantanée. Une procédure d'extraction à partir de latex a donc été définie.

- Différentes méthodes de séparation des lipides par chromatographie ont été étudiées :
 - chromatographie sur couches minces adaptée à la séparation des lipides non polaires, des glyco-lipides, ou des phospho-lipides
 - chromatographie liquide
 - chromatographie en phase gazeuse

4.3. Perspectives

Les acquis de cette phase méthodologique ont permis de lancer l'étude de la composition en lipides de feuilles de caoutchouc naturel séché à l'air et différents paramètres :

- mésostructure : distribution des masses molaires, teneur en gel
- macrostructure et spécifications : plasticité initiale, index de rétention de plasticité, viscosité Mooney
- propriétés en mastication : index de breakdown, et cinétique suivant la baisse de viscosité au cours de la mastication.

Il est également envisagé d'étudier les propriétés physiques de caoutchouc vulcanisé provenant des échantillons de caoutchouc naturel récolté.

Les deux principaux facteurs devant être étudiés en relation avec la qualité du caoutchouc sont les clones (variétés et les variations saisonnières. Concernant le clone RRIM600, l'âge des arbres sera également pris en compte.

5. Facteurs d'amélioration de la production de bois d'hévéa

Depuis 25 ans, le bois d'hévéa a pris une importance économique croissante dans le secteur de l'hévéaculture en Asie, principalement en Malaisie et en Thaïlande, les deux premiers exportateurs mondiaux de bois d'hévéa et de produits fabriqués à partir de ce bois. La dynamique de recherche créée, dans le cadre du projet Hévéa-Agriculture n° 3, en écophysiologie de l'arbre saigné conduisait à s'intéresser à la formation de biomasse et de bois, comme résultante de la compétition pour les assimilats entre la croissance des hévéas et la production de latex. Cette thématique comporte par ailleurs de nouveaux enjeux relatifs à l'utilisation de bois de plantations pour la préservation des forêts naturelles et à la séquestration de carbone (sous forme de bois et de caoutchouc chez l'hévéa)

comme méthode de modération des processus d'effet de serre et de réchauffement climatique.

Le financement, par le Fonds régional d'appui à l'éducation et à la recherche de l'Ambassade de France à Bangkok, de deux ateliers régionaux (12-14 novembre 2003, ainsi que 25-27 mai 2005 sur un report de financement 2004) portant sur le bois d'hévéa et associant des chercheurs de Malaisie, d'Indonésie, du Vietnam et du Cambodge, a permis une réflexion pour un élargissement des thèmes développés dans le cadre du projet.

Ces deux ateliers étaient centrés sur les conditions agronomiques de la production de la biomasse et du bois chez l'hévéa saigné. Bien que le concept de plantation forestière à base d'hévéas non saignés ait été discuté, les réflexions se sont principalement attachées à l'étude de l'intégration des productions de latex et de bois dans le cadre de parcelles saignées classiques. Le thème du bois d'hévéa est intégré dans les démarches d'amélioration variétale, notamment depuis le développement du concept de « latex-timber clone » en Malaisie ; cette approche est nécessairement conduite pour le très long terme tandis que des recommandations clonales prenant en compte la valorisation du bois sont déjà possibles sur la base des clones existants.

Différents travaux ont été présentés sur les aspects méthodologiques de l'estimation des volumes de bois disponibles sur les plantations sur pied. Les relations possibles entre d'une part les dispositifs et la densité de plantation et d'autre part la production de bois ont fait l'objet de plusieurs présentations et ont été discutées. Une première approche de prédiction de la formation de biomasse au cours de la croissance des hévéas saignés, intégrée dans le contexte de la compétition entre croissance et production de latex, et réalisée en Thaïlande dans le cadre du projet Hévéa-Agriculture 3, a été présentée. Les principaux facteurs identifiés de la production de bois d'hévéa seraient l'architecture des clones, l'âge de mise en saignée, la densité de plantation, la vitesse de croissance avant et pendant la saignée, l'intensité des systèmes de saignée, la sensibilité aux dommages dus au vent, et la durée des cycles de saignée des parcelles d'hévéa. Enfin, une estimation approximative de l'impact de la valorisation du bois d'hévéa sur la rentabilité des parcelles, à l'échelle de la durée totale du cycle d'exploitation, chiffrerait la part du bois d'hévéa à 15 % de la rentabilité totale.

Une conclusion importante est que le bois d'hévéa, tout en constituant un supplément de revenu pour les planteurs, ne doit jamais conduire à sacrifier sur la production de latex, notamment du fait que les revenus du latex commencent à partir de la mise en saignée tandis que le revenu du bois n'arrive qu'à la fin du cycle de la parcelle. Il n'est en particulier pas recommandé de retarder la mise en saignée pour favoriser la croissance des arbres. En revanche une augmentation raisonnée de la densité de plantation pourrait présenter un avantage global, notamment pour les petits planteurs thaïlandais peu attachés à la productivité du travail de la saignée.

Parmi les différents facteurs agronomiques pouvant faire l'objet de recherches spécifiques, il est ressorti que deux d'entre eux ont paru prioritaires pour contribuer à l'amélioration de la production de bois d'hévéa au niveau des plantations : d'une

part la modélisation de la croissance de l'arbre saigné à l'échelle de la vie de la parcelle, et d'autre part la construction d'une base de données technico-économiques servant d'aide à la décision pour les planteurs, les industriels du bois et les autres intervenants dans le secteur de la valorisation du bois d'hévéa en Asie du Sud-Est. C'est sur cette base que le deuxième atelier a été fortement orienté sur la présentation de la méthodologie des modèles de croissance. Concernant l'hévéa, ces modèles devraient évidemment prendre en compte l'impact de la saignée sur la croissance.

Conclusion

Le projet Hévée-Agriculture 3, dans sa période 2002-2004, a contribué efficacement à la dynamisation du projet franco-thaïlandais de recherche et de formation « Vers l'amélioration de la productivité de l'hévée », en assurant le financement des frais de déplacement de 10 missions en Thaïlande de chercheurs français, de 4 missions en France de professeurs et chercheurs thaïlandais en France, et surtout de 7 stages en France de 4 étudiants et jeunes chercheurs thaïlandais réalisant un Ph.D. La durée cumulée des stages a été de 13 mois.

A la fin de l'année 2004, une démarche expérimentale d'analyse génétique des facteurs biochimiques de la typologie métabolique des clones cultivés est mise en place, avec l'obtention d'une carte génétique saturée qui a été achevée en mai 2005. Elle constitue la première étape d'une mise en relation des méthodes de génétique moléculaire et de sélection conventionnelle pour l'amélioration de la production de latex. L'étude en champ de 196 clones du croisement RRIM600 x PB217 fait l'objet d'une caractérisation de la croissance et d'autres facteurs agronomiques, et devrait également permettre l'identification de clones performants pour le développement.

Les principaux résultats obtenus en écophysiologie sont les suivants :

- La cartographie de l'aire d'écorce drainée par l'écoulement du latex lors de la saignée montre une augmentation de la surface de l'aire drainée avec l'intensification de l'exploitation.
- La mesure des variations de croissance radiale du tronc est apparue comme un bon indicateur de la disponibilité en eau chez les arbres non saignés, tandis que cette croissance radiale est fortement perturbée par la saignée. Le ralentissement de la croissance consécutif à la reprise de saignée en début de saison des pluies est observé très rapidement, en moins de deux semaines. De plus, aucune différence de croissance n'est observée en saison sèche, pendant l'arrêt de saignée du motif normalement saigné, entre les motifs normalement saignés et non saignés, indiquant l'absence probable d'arrière effet de la saignée ; il faut néanmoins remarquer que cette croissance en saison sèche est particulièrement faible. Ces résultats confirment donc que la compétition entre croissance et production de latex s'exerce directement et quasi immédiatement sur les assimilats hydrocarbonés de la photosynthèse.
- L'activité respiratoire est importante en période de végétation (saison des pluies), et minimale lors de la période de défoliation-refoliation en saison sèche. On observe une forte relation entre l'activité respiratoire de l'écorce et la croissance radiale du tronc non saigné ; en revanche, la respiration du tronc saigné est fortement modifiée, avec une forte variabilité entre arbres, notamment entre les arbres stimulés, et sans relation avec la croissance. La question de la relation entre respiration et saignée reste à approfondir.
- Les réserves hydrocarbonées sont essentiellement constituées d'amidon dans le bois. Un stockage plus important est observé au niveau de l'encoche de

saignée, qu'on explique par un appel d'assimilats particulièrement important vers ce puits physiologique ; en revanche, on rappelle que c'est aussi la zone de croissance minimale du tronc saigné. Les réserves s'accumulent au cours de la période de végétation et jusqu'à la défoliation. Un déstockage important intervient lors de la refoliation. Cette étude de la dynamique des réserves est poursuivie avec un objectif de mise en relation avec l'intensité d'exploitation du latex. L'activité enzymatique associée au déstockage par hydrolyse de l'amidon en saccharose, en relation avec l'intensité d'exploitation, est également étudiée.

- Une paramétrisation pour l'hévéa du modèle de photosynthèse de Farquhar et du modèle de conductance stomatique de Jarvis a été réalisée, permettant d'évaluer l'importance des facteurs climatiques sur la photosynthèse et la transpiration. L'influence de la température sur la capacité photosynthétique et surtout sur la conductance stomatique est apparue particulièrement importante, avec des effets de réduction importants pour une étroite variation de température autour de son optimum. Les facteurs de la photosynthèse et de la transpiration ont été caractérisés pour différents clones et en présence de stress hydrique.
- L'étude de la vulnérabilité à l'embolie renseigne sur la sensibilité de la régulation stomatique des arbres vis-à-vis du stress hydrique. Des différences de vulnérabilité ont été trouvées entre les organes. La vulnérabilité des pétioles de feuilles serait un bon facteur de discrimination entre les clones pour cette régulation.
- Les deux modèles INRA de photosynthèse et de transpiration, appliqués à l'échelle de deux jeunes arbres entiers, fonctionnant l'un en l'absence et l'autre en présence de stress hydrique, ont fourni de bonnes prédictions de l'assimilation.

Une expérimentation a été mise en place dans le cadre du projet, avec mise en œuvre du diagnostic latex, afin d'optimiser les systèmes d'exploitation du latex sur différents clones. La démarche classique d'amélioration de la productivité du travail de saignée par la réduction de la fréquence de saignée compensée par la stimulation éthylénique s'avérait peu adaptée au contexte des très petites surfaces des plantations familiales en Thaïlande. Un système original comportant deux encoches saignées alternativement (Double Cut Alternative) a été conçu et mis en expérimentation. Sur les trois premières années de saignés, on observe une augmentation de 25 % sur la productivité des arbres (kg/arbre/an) et une augmentation identique de 25 % sur la productivité des saigneurs (kg/saigneur/jour). Ce système fait actuellement l'objet d'une évaluation de longue durée.

La composante d'étude des facteurs de variabilité de la qualité du caoutchouc naturel, mise en place plus tardivement dans le projet Hévéa, s'est attachée à préciser différents aspects méthodologiques concernant l'extraction des lipides du caoutchouc sec ou du latex, à tester différents modes de séparation par chromatographie, et à définir ses procédures expérimentales.

Dans le prolongement du projet Hévée, de l'intérêt porté à la formation de biomasse et des possibilités de séquestration de carbone par l'hévéaculture, et notamment dans le cadre de l'attention portée en écophysiologie à la compétition entre la croissance de l'arbre et la production de latex, deux ateliers régionaux, financés par le Fonds régional d'appui à l'éducation et à la recherche de l'Ambassade de France à Bangkok ont été organisés sur la question de la production agricole du bois d'hévée, ont été organisés en novembre 2003 et mai 2005, permettant de réunir 15 chercheurs de 5 pays hévéicoles du sud-est asiatique. Parmi les différents thèmes abordés, une attention particulière a été portée à la méthodologie de construction de modèles dendrométriques de croissance permettant de prendre en compte, chez l'hévée, la dualité entre production de latex et de bois.

Le projet Hévée a fait l'objet d'une évaluation en 2004 et a été reconduit sur la période 2004-2010 dans ses 3 composantes de génétique, d'écophysiologie et d'étude de la qualité, avec un élargissement des objectifs en écophysiologie prenant en compte l'étude des flux de carbone et d'eau entre un couvert végétal hévéa et l'atmosphère pour évaluer les capacités de séquestration de carbone atmosphérique de l'hévéaculture, et avec un élargissement des partenariats à l'Ird, l'Inra-Bordeaux (France) et l'Université Prince of Songkhla (Thaïlande). Les recherches de ce projet devraient permettre la réalisation de 9 thèses de Ph.D :

Génétique :

- Marqueurs génétiques microsatellites et identification de QTLs associés aux facteurs de la typologie métabolique des clones chez l'hévée

Ecophysiologie :

- Etude de la dynamique de stockage et de remobilisation des réserves hydrocarbonées chez l'hévée saigné (thèse en cours, Ms Pisamai Chantuma)
- Effets du stress abiotique chez l'hévée (saignée, stress hydrique, stress lié au froid). Echanges de gaz (CO₂, H₂O) et d'eau de l'arbre entier avec son environnement.
- Flux de carbone et d'eau à l'échelle du tronc de l'hévée saigné.
- Flux de carbone, d'eau et d'énergie entre un peuplement d'hévée et l'atmosphère, mesuré par la méthode des fluctuations turbulentes (eddy correlations).
- Respiration de surface au niveau du sol sous un couvert végétal d'hévée.

Qualité :

- Influence des composants non isoprène sur la structure et les propriétés du caoutchouc naturel.
- Etude de la formation de films de caoutchouc naturel et de leur perméabilité.
- Microbiologie de la maturation du caoutchouc naturel.

La proposition du projet Hévée au second appel à propositions du Programme de Coopération franco-thaïlandais pour l'Enseignement Supérieur et la Recherche, pour la période 2005-2008, a reçu une réponse positive.

Bibliographie

- Chantuma, A., Thaler, P., Chantuma, P., and Gohet, E. (2003). Estimation of biomass of three clones with different architectures. Rubberwood, Cropping and Research workshop (RWCR 2003), 12-14 November 2003, Bangkok.
- Clément-Demange, A., Thaler, P., Gnagne, M., Doumbia, A., and Gohet, E. (2003). Rubberwood production as part of rubber cropping (*Hevea brasiliensis*). How can research contribute to profitability. Regional workshop RWCR Bangkok 2003, November 12-14, funded by the French Ministry of Foreign Affairs.
- Gohet, E., and Chantuma, P. (2003a). Double cut alternative tapping system (DCA) : towards improvement of yield and labour productivity of thailand rubber smallholdings. In "IRRDB Workshop on exploitation technology", Kottayam, India.
- Gohet, E., and Chantuma, P. (2003b). Reduced tapping frequency and DCA tapping systems: Research towards improvement of Thailand rubber plantations productivity. Irrdb symposium "Challenges for natural rubber in globalization", September 15-17, Chiang Mai, Thailand.
- Gohet, E., Chantuma, P., Lacote, R., Obouayeba, S., Dian, K., Clement Demange, A., Kurnia, D., and Eschbach, J. M. (2003). Latex clonal typology of *Hevea brasiliensis*. Physiological modelling of yield potential and clonal response to Ethephon stimulation. In "IRRDB Workshop on exploitation technology", Kottayam, India.
- Lekawipat, N. (2004). Comparison of gene and non-gene specific molecular markers for evaluating genetic diversity in rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Tropical Agriculture), Graduate School, Kasetsart University, April 2004. ISBN 974-273-560-3.
- Lekawipat, N. (2005). Development of genetic map of RRIM600 x PB217 based on microsatellite markers. Cirad-Biotrop, Montpellier, January-May 2005. Doras-Rubber : Towards the improvement of the productivity of the rubber tree. Genmap component : "Variability analysis and genetic determinism of some physiological characteristics of the productivity in Thailand".
- Lekawipat, N., Teerawatanasuk, K., Rodier, G., M, Seguin, M., Vanavichit, A., Toojinda, T., and Tragoonrung, S. (2003a). Genetic diversity analysis of wild germplasm and cultivated clones of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. by using microsatellite markers. *Journal of Rubber Research* 6, 36-47.
- Lekawipat, N., Teerawatanasuk, K., Vanavichit, A., Toojinda, T., and Tragoonrung, S. (2003b). Evaluating the genetic relatedness of wild and cultivated *Hevea brasiliensis* accessions with SSCP markers. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 35, 123-134.
- Prapan, K., Clément-Demange, A., Teerawatanasuk, K., Rodier-Goud, M., and Seguin, M. (2004). Genetic mapping and field study of a full-sib family (RRIM600 x PB217) in *Hevea brasiliensis* (Genmap project). First results. "Towards the improvement of the productivity of the rubber tree ". Kasetsart University - Rrit-Doa - Inra-Piaf - Cirad Seminar, Bangkok, 27-28 May, 2004.
- Prapan, K., Seguin, M., Rodier-Goud, M., and Clément-Demange, A. (2004). *Hevea brasiliensis*: Déterminisme génétique et localisation de composantes physiologiques de la productivité de l'hévéaculture par approche QTL en

- Thaïlande. Réalisation d'une carte génétique ancrée sur marqueurs microsatellites. Programme Agropolis "Plate-Forme de Recherches Avancées", composante Genmap du projet Doras-Rubber, CP_SIC 1676, janvier 2004.
- Sangsing, K. (2004). Carbon acquisition and plant water status in response to water stress of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy (Tropical Agriculture). The Graduate School, Kasetsart University, Defended on May 12, 2004.
- Sangsing, K., Kasemsap, P., Thanisawanyangkura, S., Sangkhasila, K., Gohet, E., Thaler, P., and Cochard, H. (2004). Xylem embolism and stomatal regulation in two rubber clones (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Trees* (2004) 18 : 109-114.
- Seguin (2005). Second update of the mapping work of Genmap in Montpellier between September 2003 and December 2004 - April 2005.
- Seguin, M. (2003). Doras-Rubber, Genmap component. Variability analysis and genetic determinism of some physiological characteristics of the productivity in Thailand. Development of a genetic map of RRIM600 x PB217 based on microsatellite markers. Update of the mapping work of Ms Kanlaya Prapan In Montpellier (Agropolis funding), July 2003.
- Silpi, U. (2004). Carbon partition in *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. : Dynamics among functional sinks (latex regeneration, respiration, growth, and reserve) at trunk scale. Thesis defended on May 12, 2004. Graduate school, Kasetsart University.
- Silpi, U., Chantuma, P., Kasemsap, P., Thaler, P., Thanisawanyangkura, S., Lacoïnte, A., Améglio, T., and Gohet, E. (2004). Spatial distribution of sucrose and metabolic activity in the laticiferous tissue of three *Hevea brasiliensis* clones. Irrdb meeting, Kunming, 6-11 September, 2004.
- Silpi, U., Thaler, P., Kasemsap, P., Lacoïnte, A., Chantuma, A., Adam, B., Gohet, E., Thanisawanyangkura, S., and Améglio, T. (2006). Effect of tapping activity on the dynamics of radial growth of *Hevea brasiliensis* trees. *Tree Physiology*, Accepted.
- Silpi, U., Chantuma, P., Kasemsap, P., Thaler, P., Thanisawanyangkura, S., Lacoïnte, A., Améglio, T., and Gohet, E. (2006). Distribution pattern of sucrose and metabolism in the laticiferous tissue of three *Hevea brasiliensis* clones : effect of tapping and stimulation at trunk scale. *J. Rubb. Res.* (Malaysia), in press.
- Silpi, U., Chantuma, P., Kosaisawe, J., Thanisawanyangkura, S., and Gohet, E. (2001). Distribution pattern of latex sucrose and metabolic activity in response to tapping and ethrel stimulation in latex producing bark of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. In "Annual IRRDB Meeting" (J. Sainte-Beuve, ed.). CIRAD, Montpellier, France.
- Thaler, P., Chantuma, A., Gohet, E., Chantuma, P., Silpi, U., Sangsing, K., Kasemsap, P., and Thanisawaniangkura, S. (2003). Carbon balance of rubber plantations, IRRDB special meeting of rubber plant physiologists on carbon sequestration, Bangkok, Thailand, 14-15 October 2003.
- Vaysse, L., Liengprayoon, S., Santisopasri, V., and Sriroth, K. (2004). Investigation of new criteria for the prediction of manufacturing behaviour of natural rubber. Kasetsart University Fair, Bangkok, Thailand, 30 January - 07 February 2004.

ANNEXE 1 - Institutions et principaux chercheurs et étudiants participant au projet Hévée-Agriculture n° 3 (2002-2004).

Cirad

Eric Gohet	Bangkok, écophysiologie, systèmes d'exploitation
Philippe Thaler	Bangkok, écophysiologie
Laurent Vaysse	Bangkok, qualité du caoutchouc
Marc Seguin	Montpellier, génétique moléculaire
André Clément-Demange	Montpellier, génétique et phénotypage
Anne Clément	Montpellier, écophysiologie
Frédéric Bonfils	Montpellier, qualité du caoutchouc
Jérôme Sainte-Beuve	Montpellier, coordination de projet

Inra-Piaf (Umr Piaf)

Hervé Sinoquet	Clermont-Ferrand, écophysiologie
André Lacointe	Clermont-Ferrand, écophysiologie
Thierry Améglio	Clermont-Ferrand, écophysiologie
Hervé Cochard	Clermont-Ferrand, écophysiologie
Boris Adam	Clermont-Ferrand, écophysiologie

Umr Piaf, Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand)

Agnès Guillot	Clermont-Ferrand, écophysiologie
---------------	----------------------------------

Kasetsart University

Dr Sornprach Thanisawanyangkura	Bangkok, coordination de projet
Dr Poonpipope Kasemsap	Bangkok, écophysiologie
Dr Somvong Tragoonrung	Bangkok, génétique moléculaire
Dr Kumut Sangkhasila	Bangkok, écophysiologie
Dr Klanarong Sriroth	Bangkok, qualité du caoutchouc
Ms Natedao Musigamart	Bangkok, écophysiologie
Ms Chutiwan Nimitmai	Bangkok, qualité du caoutchouc
Mr Jirawat Chedchan	Bangkok, qualité du caoutchouc
Ms Daranee Visitnontachai	Bangkok, qualité du caoutchouc
Ms Unakorn Silpi	Bangkok, écophysiologie
Ms Siriluck Liengprayoon	Bangkok, vers Ph.D en qualité du caoutchouc
Mr Pongpan Siripornpakdeekul	Bangkok, écophysiologie

Rrit-Doa

Mr Prasat Kesawapitak	Bangkok, direction Rrit-Doa
Mr Polchit Buakaew	Bangkok, direction Rrit-Doa
Mr Chamnong Kongsin	Chachoengsao, direction station
Mr Arak Chantuma	Chachoengsao, écophysiologie
Mr Krissada Sangsing	Bangkok, vers Ph.D en écophysiologie
Ms Pisamai Chantuma	Chachoengsao, vers Ph.D en écophysiologie
Ms Kanikar Teerawatanasuk	Chachoengsao, amélioration génétique
Ms Kanlaya Prapan	Chachoengsao, cartographie génétique
Ms Napawan Lekawipat	Bangkok, vers Ph.D en génétique

ANNEXE 2 - Evaluation finale du projet

(Document rédigé selon les normes proposées par le Service de Coopération et d'Action Culturelle de l'Ambassade de France à Bangkok).

Programme de Coopération franco-thaïlandais Pour l'Enseignement Supérieur et la Recherche

Evaluation Finale des Projets

Intitulé du Projet

Hevecophysio : fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa.
Premier appel d'offres (2001) du Programme Franco-Thaïlandais pour
l'Enseignement Supérieur et la Recherche (Projet Hévéa - Projet Agriculture n° 3).

Nom de l'établissement/ institution responsable du projet

Cirad

Nom du responsable français du projet

André Clément-Demange

DEVELOPPEMENT SCIENTIFIQUE EU EGARD AUX OBJECTIFS AFFICHES

Rappel des objectifs du projet

La proposition "Hevecophysio : fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa" initialement faite au premier appel d'offres du Programme Franco-Thaïlandais pour l'Enseignement Supérieur et la Recherche (2001) s'inscrivait dans le cadre d'un projet de recherche sur l'hévéa en Thaïlande développé depuis 1998 par les partenaires suivants : Cirad et INRA-Piaf (France), Université de Kasetsart et Rrit-Doa (Thaïlande), et intitulé : "Vers l'amélioration de la productivité de l'hévéa (Towards the improvement of the productivity of the rubber tree)". Cette proposition a été acceptée et financée par le Programme Franco-Thaïlandais sous la dénomination : "Projet Hévéa - Programme Agriculture n° 3" qui a pris en compte non seulement l'objectif initial de la proposition, centré sur l'écophysiologie (fonctionnement hydrique et carboné de l'hévéa), mais aussi les deux autres composantes du projet Hévéa portant d'une part sur la génétique (cartographie génétique et déterminisme de la typologie métabolique des clones) et d'autre part sur l'étude de la qualité du matériau caoutchouc.

Les objectifs de recherche soutenus par le projet étaient de développer la compréhension du fonctionnement écophysiologique et génétique de l'hévéa aux différents niveaux de l'arbre et de la parcelle cultivée afin de faciliter la sélection clonale et optimiser les systèmes de saignée, et d'étudier l'influence des facteurs agronomiques sur les caractéristiques du produit « caoutchouc naturel ».

Les objectifs de formation visaient la formation diplômante d'étudiants ou de jeunes chercheurs thaïlandais avec leur participation directe à ces thématiques de recherche, un encadrement français en Thaïlande et en France (stages annuels), et un encadrement académique et pratique de l'Université thaïlandaise Kasetsart University.

Rappel des résultats escomptés aux niveaux formation et recherche

a) Au niveau formation :

- finalisation d'une thèse de Ph.D engagée en génétique de l'hévéa
- lancement et conduite jusqu'à leur terme de deux thèses en écophysiologie
- lancement d'une thèse en écophysiologie (non encore soutenue)
- initiation d'une rec
- initiation d'une thèse dans le domaine de la qualité du caoutchouc
- préparation de deux projets de thèses en écophysiologie'une nouvelle thèse en écophysiologie.

b) Au niveau recherche :

- acquisition de données quantifiées concernant d'une part la réponse de l'arbre à la saignée et à la stimulation éthylénique, et d'autre part l'interaction entre la production de latex, la croissance en épaisseur du tronc, la respiration, et la dynamique de stockage des réserves en amidon dans le bois
- paramétrage pour l'hévéa de modèles de fonctionnement INRA (photosynthèse et utilisation de l'eau), et application de ces modèles au jeune hévéa en croissance, avec ou sans stress hydrique
- maîtrise de l'utilisation des marqueurs génétiques moléculaires de type microsatellite sur hévéa et application à la cartographie génétique d'une descendance pour une approche QTL visant la caractérisation génétique de caractères agronomiques, mise en place de l'essai en champ correspondant
- identification des facteurs de variation du caoutchouc naturel en vue de réduire cette variabilité.

Résultats atteints

- Soutenance de 3 thèses à Kasetsart University (Napawan Lekawipat, Rrit-Doa, génétique, avril 2004 ; Unakorn Silpi, étudiante Kasetsart, écophysiologie de l'hévéa adulte, 12 mai 2004 ; Krissada Sangsing, Rrit-Doa, écophysiologie du jeune hévéa en croissance, 12 mai 2004).
- Démarrage en 2002 d'une thèse en écophysiologie, à Kasetsart University (Pisamai Chantuma, Rrit-Doa, dynamique de la formation et du déstockage des réserves hydrocarbonées chez l'hévéa en saignée).
- Initiation en 2004 d'un travail de Master, dans la continuité du sujet de thèse de Ms Unakorn (Mr Pongpan Siripornpakdeekul, étudiant Kasetsart) : écophysiologie, analyse de la respiration des troncs d'hévéa saignés.
- Préparation en 2004 d'un nouveau sujet de thèse dans la continuité des sujets de thèse de Ms Unakorn et de Mr Krissada (Ms Boonthida Kositsup, étudiante Chulalongkorn, en partenariat avec Kasetsart) : écophysiologie, réponse de l'hévéa saigné aux stress abiotiques, relation entre température et activité photosynthétique.

- Préparation en 2004 d'une nouvelle composante d'étude en écophysiologie, portant sur l'étude des flux de carbone au dessus de la canopée d'un couvert d'hévéa (eddy correlations et séquestration de carbone).
- Préparation en 2004 d'un sujet de thèse portant sur l'analyse de la variabilité du caoutchouc (Ms Siriluck Liengprayoon, étudiante Kasetsart).
- Cartographie génétique de la descendance RRIM600 x PB217 réalisée principalement en 2002, achevée en mai 2005 ; installation en champ et suivi de l'essai correspondant pour la mise en œuvre d'une approche "QTL" visant la caractérisation du déterminisme génétique de la typologie métabolique des clones d'hévéa.

Commentez les écarts éventuels entre prévisions et réalisations

Une difficulté de financement des activités de laboratoire en génétique moléculaire à Montpellier a provoqué une interruption de deux ans de la cartographie génétique. Le financement de 3 mois d'accueil en laboratoire (3750 euros) a finalement été apporté par le Cirad, permettant l'achèvement de ce travail entre janvier et mai 2005.

<h3>COMPLEMENTARITE DE LA COOPERATION (apport et intérêt de chaque partie)</h3>
--

Relations en général et concertations entre les partenaires français et thaïlandais

Les relations entre partenaires français et thaïlandais sont particulièrement étroites du fait de la présence permanente à Kasetsart University de 3 chercheurs Cirad résidents participant à ce projet dans le domaine de l'écophysiologie et de l'étude de la qualité du caoutchouc. La composante génétique du projet est coordonnée par un chercheur Cirad en poste à Montpellier qui a pu réaliser 4 missions en Thaïlande sur la période 2002-2004.

2.2. Fréquence des concertations

Concertation permanente entre les 3 chercheurs Cirad en poste à Bangkok et les partenaires thaïlandais.

Mission INRA en Thaïlande en décembre 2001 pour le lancement des deux sujets de thèse en écophysiologie. Accueil annuel en France des deux thésards. Participation de 3 chercheurs INRA aux soutenances des deux thèses en mai 2004.

Mission en France en novembre 2002 (Cirad à Montpellier et INRA à Clermont-Ferrand) des deux principaux responsables du projet pour Kasetsart University.

Contacts semestriels entre chercheurs français du Cirad et de l'INRA.

Colloque de présentation des résultats et d'évaluation du projet organisé à Bangkok par Kasetsart University en mai 2004.

Fréquence des concertations

CONTRIBUTION A LA FORMATION DE JEUNES CHERCHEURS ET/OU DOCTORANTS

Nombre de thèses de doctorat développées dans le cadre du projet

Trois thèses soutenues en 2004 (Napawan Lekawipat, Unakorn Silpi, Krissada Sangsing)

Nombre de jeunes chercheurs français et thaïlandais impliqués par des stages et de séjours de recherche

Uniquement stages en France d'étudiants et chercheurs thaïlandais au cours de la période 2002-2004 : 5. Il n'y a pas eu de jeune chercheur français impliqué car nous souhaitions concentrer le projet sur la formation des chercheurs thaïlandais.

Nombre de Post-doc

0 -

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS / AUTRES RETOMBÉES (brevets, innovation,...)

Donnez le nombre et la nature des publications

Trois thèses de Ph.D soutenues à l'Université de Kasetsart :

- Lekawipat, N. (2004). Comparison of gene and non-gene specific molecular markers for evaluating genetic diversity in rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy (Tropical Agriculture), Graduate School, Kasetsart University, April 2004. ISBN 974-273-560-3.

- Sangsing, K. (2004). Carbon acquisition and plant water status in response to water stress of rubber (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg). A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Doctor of Philosophy (Tropical Agriculture). The Graduate School, Kasetsart University, Defended on May 12, 2004.

- Silpi, U. (2004). Carbon partition in *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. : Dynamics among functional sinks (latex regeneration, respiration, growth, and reserve) at trunk scale. Thesis defended on May 12, 2004. Graduate school, Kasetsart University.

Quatre publications dans des journaux scientifiques à comité de lecture

- Lekawipat, N., Teerawatanasuk, K., Rodier, G., M, Seguin, M., Vanavichit, A., Toojinda, T., and Tragoonrung, S. (2003a). Genetic diversity analysis of wild

germplasm and cultivated clones of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. by using microsatellite markers. *Journal of Rubber Research* 6, 36-47.

- Lekawipat, N., Teerawatanasuk, K., Vanavichit, A., Toojinda, T., and Tragoonrung, S. (2003b). Evaluating the genetic relatedness of wild and cultivated *Hevea brasiliensis* accessions with SSCP markers. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics* 35, 123-134.

- Sangsing, K., Kasemsap, P., Thanisawanyangkura, S., Sangkhasila, K., Gohet, E., Thaler, P., and Cochard, H. (2004). Xylem embolism and stomatal regulation in two rubber clones (*Hevea brasiliensis* Muell. Arg.). *Trees* (2004) 18 : 109-114.

- Silpi, U., Thaler, P., Kasemsap, P., Lacointe, A., Chantuma, A., Adam, B., Gohet, E., Thanisawanyangkura, S., and Améglio, T. (2005). Effect of tapping activity on radial growth of *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. A dynamic study at seasonal scale. Submitted to *Tree Physiology* (October 2005).

Manifestations scientifiques : séminaires, conférences, ateliers,...

Séminaire de présentation de résultats et d'évaluation du projet, organisé par Kasetsart University à Bangkok les 27 et 28 mai 2004.

Deux ateliers régionaux organisés à Kasetsart University (Bangkok) sur les facteurs d'amélioration de la production de bois d'hévéa (12-14 novembre 2003, et 25-27 mai 2005).

Communications aux meetings IRRDB (International Rubber Research and Development Board) :

- Irrdb, Chiang Mai, 15-17 septembre 2003
- Irrdb, Kottayam, Inde, 15-18 décembre 2003
- Irrdb, Kunming, Chine, 6-11 September, 2004

ADEQUATION DES MOYENS DEMANDES/ACCORDES/UTILISES EU EGARD AUX RESULTATS
--

**Nombre de missions demandées/accordées/utilisées de Professeurs /
Chercheurs français en Thaïlande (commentez)**

- Jérôme Sainte-Beuve (Cirad) : 1
- Marc Seguin (Cirad) : 1
- André Clément-Demange (Cirad) : 4
- Frédéric Bonfils (Cirad) : 1
- André Lacointe (Inra) : 1
- Hervé Cochard (Inra) : 1
- Thierry Améglio (Inra) : 1

Bonne satisfaction des besoins.

Nombre de missions demandées/accordées/utilisées de Professeurs / Chercheurs thaïlandais en France (commentez)

- Dr Sornprach Thanisawanyangkura (Kasetsart) : 1
- Dr Poonpipope Kasemsap (Kasetsart) : 2
- Dr Kumut Shangkhasila (Kasetsart) : 1

Bonne satisfaction des besoins.

Nombre de mois de séjour demandés/accordés/utilisés de jeunes chercheurs et/ou doctorants français en Thaïlande (commentez)

0 -

Le projet était orienté sur la formation d'étudiants et de chercheurs thaïlandais. Nous avons donc privilégié cet objectif et n'avons pas engagé de jeune chercheur français sur le projet.

Nombre de mois de séjour demandés/accordés/utilisés de jeunes chercheurs et/ou doctorants thaïlandais en France (commentez)

- Ms Kanlaya Prapan : 12 mois en 2002 à Montpellier (Cirad) sur autre financement (Agropolis)
- Ms Unakorn Silpi : 1 mois en 2002, 1 mois en 2003, 2 mois en 2004 à l'INRA-Piaf et secondairement à Montpellier
- Mr Krissada Sangsing : 1 mois en 2002 et 1 mois en 2003 à l'INRA-Piaf
- Ms Pisamai Chantuma : 2 mois en 2004 (Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand = Umr Piaf, et Montpellier)
- Ms Napawan Lekawipat : 5 mois en 2005 sur reliquat de financement 2004 à Montpellier (Cirad).

Bonne satisfaction des besoins.

Liens avec d'autres programmes (RGJ, ASIA-LINK, DUO, ...) et ouverture regionale
--

Programmes bilatéraux (EIFFEL, RGJ, DUO-France,...)

Non

Programmes Multilatéraux (ASIA-LINK, AUNP, ERASMUS MUNDUS,...)

Non

Programmes régionaux

Non

Perspectives de coopération post-projet

Envisageriez-vous de développer de nouveaux projets avec les mêmes partenaires thaïlandais, d'autres partenaires ? (Quel type de projet, cadre,...)

Le projet Hévéa-Agriculture n° 3 faisait suite à l'appui annuel apporté par l'Ambassade de France au projet "Vers l'amélioration de la productivité de l'hévéa" de 1999 à 2001. Ce projet qui associait le Cirad, l'Inra-Piaf, Kasetsart University et le Rrit-Doa de 1998 à 2004 a été renouvelé et reconduit pour la période 2004-2010 avec une actualisation des objectifs de recherche sur la base des résultats obtenus, l'initiation de nouvelles formations diplômantes (Master et Ph.D.), et l'extension à de nouveaux partenaires français (Inra-Bordeaux, Ird) et thaïlandais (Prince of Songkhla University). Nous avons répondu au second appel d'offre du Programme de Coopération franco-thaïlandais en septembre 2004 afin de continuer à bénéficier du financement des missions et stages dans le cadre de ce projet.

Observations et remarques

Sur la période 2002-2005, le nombre de missions et stages financés a été au niveau de ce qui était nécessaire. Les délais de mise en place en 2002 des missions et stages avaient généré un crédit de budget qui a pu être reporté sur les années suivantes, et un reliquat de financement a pu être consommé au cours du premier semestre 2005 pour l'achèvement d'actions programmées normalement sur 2004. Cette souplesse de fonctionnement a été appréciable, notamment parce qu'elle a facilité la transition entre la période 2002-2004 (premier appel d'offres) et la période suivante (second appel d'offre).

L'absence totale de participation du budget au fonctionnement des laboratoires a d'abord été perçue comme un recul par rapport à l'aide initialement apportée par l'Ambassade de France à Bangkok pendant la période 1999-2001. C'est une contrainte dans la mesure où on peut disposer de possibilités de venue en France d'étudiants ou chercheurs étrangers sans nécessairement disposer d'un budget de fonctionnement en laboratoire adéquat. C'est notamment cette situation qui a conduit à repousser à début 2005 l'achèvement de la carte génétique entreprise, après deux ans d'interruption. Cette "règle du jeu" est néanmoins acceptée.

Le point le plus problématique concerne en fait non pas le fonctionnement de ce premier programme 2002-2004 mais celui du second appel d'offre (2005-2008). Notre proposition à ce second appel d'offre a en effet été retenue, mais avec une raréfaction drastique de l'appui apporté. Alors que le premier appel d'offre (Projet Agriculture n° 3) avait fortement contribué à modeler notre organisation sur la base des échanges réguliers rendus possibles entre partenaires français et thaïlandais, la brutale baisse de ces possibilités fait problème à un moment où notre projet

prévoit l'augmentation du nombre de thèses encadrées. Il semblerait que le partenaire MEN-DRIC n'a pas rendu disponibles les moyens nécessaires à la réalisation de ce second programme.
